

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA DI FILTRAGGIO DC  
PER UN COLLEGAMENTO HVDC A TIRISTORI

Relatore: Prof. Enrico Tironi

Correlatore: Ing. Ivan Valadè

Tesi di Laurea Magistrale di:  
Corrado Mussi  
Matr. 796318

Anno Accademico 2013-2014



---

# INDICE

INDICE.....	1
INDICE DELLE FIGURE.....	5
INDICE DELLE TABELLE .....	7
INDICE DEI GRAFICI.....	9
ABSTRACT .....	12
1 INTRODUZIONE .....	14
2 STATO DELL'ARTE .....	16
2.1 I sistemi HVDC .....	16
2.1.1 Vantaggi e svantaggi della trasmissione in continua.....	16
2.1.2 Struttura di un impianto HVDC.....	18
2.2 Le armoniche nei sistemi HVDC.....	24
2.3 Sistema di filtraggio lato DC .....	27
2.3.1 Reattore di spianamento .....	27
2.3.2 Filtri DC.....	28
2.3.2.1 Filtro ad accordo singolo .....	28
2.3.2.2 Filtro passa alto .....	29
2.3.2.3 Filtro ad accordo doppio.....	30
3 INTERFERENZE CAUSATE DAL COLLEGAMENTO HVDC AI SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE ADIACENTI.....	32
3.1 Il meccanismo fisico delle interferenze .....	33
3.2 Valutazione delle interferenze .....	36
3.2.1 Valutazione delle interferenze: la tensione indotta.....	36
3.2.2 Valutazione delle interferenze: la corrente perturbata equivalente .....	38

---

3.2.2.1	Calcolo della corrente perturbata equivalente.....	39
3.3	Definizione dei requisiti armonici lato DC.....	41
3.3.1	Correnti armoniche.....	41
3.3.2	Tensioni di rumore indotte.....	42
3.3.3	Corrente perturbata equivalente.....	42
3.3.3.1	Calcolo della corrente perturbata equivalente limite.....	45
3.4	Valutazione dei disturbi indotti in linee telefoniche adiacenti – il caso dei sistemi ferroviari.....	49
4	MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA.....	51
4.1	Convertitore – Il modello a tre impulsi.....	51
4.1.1	Calcolo delle tensioni armoniche.....	59
4.2	Dimensionamento dell’impianto di riferimento.....	60
4.2.1	Scelta dei tralicci e dei conduttori.....	60
4.2.2	Rappresentazione della linea.....	63
4.2.3	Dimensionamento del trasformatore e calcolo della reattanza trasformatorica.....	69
4.2.4	Calcolo delle tensioni del modello a tre impulsi al variare della potenza trasmessa.....	71
4.2.4.1	Raddrizzatore.....	71
4.2.4.2	Inverter.....	72
4.2.5	Configurazioni dell’impianto.....	85
4.3	Misure effettuate.....	85
5	SIMULAZIONE.....	89
5.1	Parametri della simulazione.....	89
5.1.1	Durata della simulazione.....	89
5.1.2	Passo di calcolo.....	89

---

---

5.1.3	Reattore di spianamento .....	90
5.1.4	Condensatore di neutro .....	92
5.2	Scopo della simulazione .....	97
5.2.1	Valori limite di $I_{eq}$ accettabili per l'impianto oggetto di studio.....	97
5.2.2	Verifica della necessità dei filtri.....	99
5.2.2.1	Valutazione delle armoniche causa di disturbo .....	100
5.3	Verifica delle prestazioni dei filtri: filtri ad accordo singolo.....	101
5.3.1	Filtri ad accordo singolo: risultati.....	103
5.3.2	Filtri ad accordo singolo: analisi dei risultati ottenuti .....	111
5.4	Verifica delle prestazioni dei filtri: filtri ad accordo singolo smorzati.....	112
5.4.1	Filtri ad accordo singolo smorzati – risultati .....	113
5.4.2	Filtri ad accordo singolo smorzati: analisi dei risultati ottenuti .....	121
5.5	Verifica delle prestazioni dei filtri – Filtri ad accordo doppio .....	122
5.5.1	Filtri ad accordo doppio: risultati .....	129
5.5.2	Filtri ad accordo doppio: analisi dei risultati ottenuti.....	132
5.6	Analisi dell'influenza di alcuni parametri significativi sulle prestazioni dei filtri .....	134
5.6.1	Induttanza del reattore di spianamento .....	135
5.6.2	Capacità principale del filtro .....	136
5.6.3	Ordine di risonanza del filtri.....	137
5.6.4	Tipologia di filtro .....	140
5.6.5	Fattore di qualità.....	142
5.6.6	Considerazioni conclusive.....	144
5.6.7	Analisi sull'influenza contemporanea dei parametri C ed Ls.....	145
5.7	Scelta dei filtri da installare .....	149
6	CONCLUSIONI.....	155

---

---

7	BIBLIOGRAFIA .....	157
8	APPENDICE .....	159
8.1	Dimostrazione dell'equivalenza tra due filtri ad accordo singolo in parallelo ed un filtro ad accordo doppio .....	159

---

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Schema complessivo di un impianto HVDC bipolare .....	19
Figura 2 - Trasformatore da 235 MVA per impianto HVDC.....	20
Figura 3 - Rami a valvole di un impianto HVDC.....	21
Figura 4 - Reattore di spianamento da 800 kV in fase di test.....	22
Figura 5 - Linea aerea dell'impianto HVDC Leyte - Luzon (Filippine).....	23
Figura 6 - Stazione di conversione di Longquan.....	26
Figura 7 - Struttura e andamento in frequenza dell'impedenza di un filtro ad accordo singolo .....	29
Figura 8 - Struttura e andamento in frequenza dell'impedenza di un filtro passa alto .....	30
Figura 9 - Struttura e andamento in frequenza dell'impedenza di un filtro ad accordo doppio.....	31
Figura 10 - Equivalenza tra un filtro ad accordo doppio e due filtri ad accordo singolo ....	31
Figura 11 - Ponte a reazione esafase rappresentato mediante il modello a tre impulsi.....	53
Figura 12 - Ponte a reazione dodecafase rappresentato mediante il modello a tre impulsi	53
Figura 13 - Sfasamenti relativi fra le tensioni del modello a tre impulsi .....	54
Figura 14 - Percorsi delle correnti alle armoniche 6, 18, 30 ... ..	55
Figura 15 - Percorsi delle correnti dispari .....	56
Figura 16 - Circolazione delle correnti alle armoniche caratteristiche - funzionamento monopolare.....	58
Figura 17 - Traliccio presente in Simulink come esempio.....	60
Figura 18 - Dimensioni del nuovo traliccio dimensionato per una tensione di $\pm 500$ kV....	61
Figura 19 - Schema di un elemento costituente la linea in Simulink .....	65
Figura 20 - Correnti circolanti nel ponte raddrizzatore - notazione .....	88
Figura 21 - Filtro ad accordo singolo .....	101
Figura 22 - Filtro ad accordo singolo in configurazione passa alto.....	112
Figura 23 - Schema circuitale di un filtro ad accordo doppio .....	122

---

Figura 24 - Filtri ad accordo singolo utilizzati per il calcolo dei parametri del filtro ad accordo doppio .....	123
Figura 25 - Legenda valida per i grafici dal n°29 al n°34, e per i grafici 38 e 39 .....	134
Figura 26 - Schema circuitale dei filtri oggetto di studio .....	159



---

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Valori del C-message factor alle varie frequenze .....	35
Tabella 2 - Effetti della tensione indotta sull'orecchio umano .....	37
Tabella 3 - Limiti sulle correnti armoniche fissati per l'impianto Nelson River BP2 .....	41
Tabella 4 - Esempi di valori limite di tensioni di rumore indotte utilizzati in casi reali .....	42
Tabella 5 - Esempi di valori limite di corrente perturbata equivalente in casi reali.....	43
Tabella 6 - Valori di corrente perturbata equivalente limite in funzione della resistività del terreno calcolati nell'articolo "Equivalent Disturbing Current Limit for HVDC Project in New Period" .....	45
Tabella 7 - Caratteristiche del conduttore riportato come esempio nel software Simulink	62
Tabella 8 - Caratteristiche del conduttore ACSR "Dipper" .....	62
Tabella 9 - Caratteristiche delle funi di guardia .....	63
Tabella 10 - Tempi occorrenti per la simulazione di 5 secondi di funzionamento al variare della lunghezza dei tratti con funi di guardia accessibili.....	66
Tabella 11 - Valori delle grandezze $V_{d0}$ , $u$ , $L$ al variare della potenza trasmessa.....	74
Tabella 12 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso $P=300$ MW .....	76
Tabella 13 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso $P=300$ MW .....	77
Tabella 14 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso $P=1200$ MW .....	78
Tabella 15 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso $P=1200$ MW .....	79
Tabella 16 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso $P=2100$ MW .....	80
Tabella 17 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso $P=2100$ MW .....	81

---

Tabella 18 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso P=3000 MW .....	82
Tabella 19 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso P=3000 MW .....	83
Tabella 20 - Valori dei reattori di spianamento installati in impianti reali .....	90
Tabella 21 - Definizione delle fasce in cui dividere i filtri, caso bipolare .....	98
Tabella 22 - Definizione delle fasce in cui dividere i filtri, caso monopolare .....	98
Tabella 23 - Valori di $I_{eq}$ misurati senza filtri, in funzione del valore del reattore di spianamento, con e senza condensatore di neutro - Caso bipolare.....	99
Tabella 24 - Valori di $I_{eq}$ misurati senza filtri, in funzione del valore del reattore di spianamento, con e senza condensatore di neutro - Caso monopolare.....	99
Tabella 25 - Filtri ad accordo singolo: risultati - Filtri con prestazioni in fascia .....	106
Tabella 26 - Filtri ad accordo singolo: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 3 .....	109
Tabella 27 - Filtri ad accordo singolo: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 4 .....	110
Tabella 28 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 1 .....	114
Tabella 29 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 2.....	116
Tabella 30 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 3.....	119
Tabella 31 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 4.....	120
Tabella 32 - Filtri ad accordo doppio: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 1 .....	131
Tabella 33 - Filtri ad accordo doppio: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 2.....	131
Tabella 34 - Valori del fattore di qualità dei filtri doppi .....	143
Tabella 35 - Elenco riassuntivo dei filtri che rispettano i requisiti in fascia 1 .....	151
Tabella 36 - Potenze perse [W] nelle diverse condizioni di funzionamento dai filtri aventi prestazioni conformi ai requisiti armonici di fascia 1 .....	154

---

---

## INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1 - Confronto economico HVDC vs. corrente alternata.....	18
Grafico 2 - Andamento del C-message factor in funzione della frequenza.....	36
Grafico 3 - Confronto fra C-message factor e fattore psfometrico.....	50
Grafico 4 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia al variare della lunghezza dei tratti con funi accessibili, T=20 ms .....	67
Grafico 5 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia al variare della lunghezza dei tratti con funi accessibili, T=6.67 ms .....	67
Grafico 6 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia, modelli a confronto. T=1 s....	68
Grafico 7 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia, modelli a confronto. T=20 ms .....	68
Grafico 8 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia, modelli a confronto. T= 6.67 ms.....	69
Grafico 9 - Andamento delle armoniche caratteristiche di tensione in funzione dell'angolo di sovrapposizione, per un ponte avente angolo di controllo di fase $\alpha=15^\circ$ . Tensioni espresse in valore relativo rispetto alla tensione nominale a vuoto del convertitore a reazione dodecafase.....	75
Grafico 10 – Verifica della correttezza dell'implementazione del modello a tre impulsi: spettro delle tensioni prodotte dal ponte, eliminate le vie di richiusura a terra attraverso le capacità parassite .....	84
Grafico 11 - Andamento nel tempo delle correnti nella sezione di misura 1 .....	87
Grafico 12 - Andamento a regime della $I_{\text{conv}_r3\text{sup}}$ , caso raddrizzatore acceso e inverter spento: confronto fra le due modellizzazioni del reattore di spianamento .....	91
Grafico 13 - Andamento a regime della $I_{\text{conv}_i3\text{sup}}$ , caso raddrizzatore acceso e inverter spento: confronto fra le due modellizzazioni del reattore di spianamento .....	91
Grafico 14 - Valori massimi di $I_{\text{eq}}$ misurati in funzione di Cn e P, $L_s=250$ mH – Caso bipolare.....	92

---

---

Grafico 15 - Valori massimi di $I_{eq}$ misurati in funzione di $C_n$ e $P$ , $L_s=300$ mH – Caso bipolare.....	93
Grafico 16 - Valori massimi di $I_{eq}$ misurati in funzione di $C_n$ e $P$ , $L_s=350$ mH - Caso bipolare.....	93
Grafico 17 - Valori massimi di $I_{eq}$ misurati in funzione di $C_n$ e $P$ , $L_s=250$ mH - Caso monopolare.....	94
Grafico 18 - Valori massimi di $I_{eq}$ misurati in funzione di $C_n$ $P$ , $L_s = 300$ mH - Caso monopolare.....	94
Grafico 19 - Valori massimi di $I_{eq}$ misurati in funzione di $C_n$ e $P$ , $L_s = 300$ mH - Caso monopolare.....	95
Grafico 20 - Corrente perturbata equivalente in funzione di $L_s$ e $P$ , senza condensatore di neutro - Caso bipolare.....	96
Grafico 21 - Corrente perturbata equivalente in funzione di $L_s$ e $P$ , senza condensatore di neutro - Caso monopolare.....	96
Grafico 22 - Verifica delle armoniche che maggiormente causano disturbi .....	100
Grafico 23 - Confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente $R_d$ ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo A .....	125
Grafico 24 - Confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente $R_d$ ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo B .....	127
Grafico 25 - Zoom: confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente $R_d$ ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo A .....	128
Grafico 26 - Zoom: confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente $R_d$ ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo B .....	128
Grafico 27 - Influenza del fattore di ripartizione della capacità principale sulla corrente perturbata equivalente - Funzionamento monopolare .....	133
Grafico 28- Influenza del fattore di ripartizione della capacità principale sulla corrente perturbata equivalente - Funzionamento bipolare .....	133
Grafico 29 - Valutazione dell'influenza di $L_s$ sulle prestazioni dei filtri - Caso bipolare.	135
Grafico 30- Valutazione dell'influenza di $L_s$ sulle prestazioni dei filtri - Caso monopolare .....	135

---

---

Grafico 31 - Valutazione dell'influenza della capacità principale del filtro sulle sue prestazioni - Caso bipolare .....	136
Grafico 32 - Valutazione dell'influenza della capacità principale del filtro sulle sue prestazioni - Caso monopolare .....	137
Grafico 33 - Valutazione dell'influenza delle frequenze di accordo dei filtri sulle loro prestazioni - Caso bipolare .....	138
Grafico 34 - Valutazione dell'influenza delle frequenze di accordo dei filtri sulle loro prestazioni - Caso monopolare .....	138
Grafico 35 - Valutazione delle armoniche più disturbanti nel funzionamento bipolare ...	139
Grafico 36 - Prestazioni dei filtri in funzione della loro tipologia - Caso bipolare.....	140
Grafico 37 - Prestazioni dei filtri in funzione della loro tipologia - Caso monopolare.....	141
Grafico 38 - Prestazioni dei filtri in funzione del loro fattore di qualità - Caso bipolare .	143
Grafico 39 - Prestazioni dei filtri in funzione del loro fattore di qualità - Caso monopolare .....	144
Grafico 40 - Influenza dei parametri C e Ls sulle prestazioni dei filtri ad accordo singolo - Funzionamento bipolare .....	146
Grafico 41 - Influenza dei parametri C e Ls sulle prestazioni dei filtri ad accordo singolo - Funzionamento monopolare .....	146
Grafico 42 - Influenza dei parametri C e Ls sulle prestazioni dei filtri passa alto - Funzionamento bipolare .....	147
Grafico 43 - Influenza dei parametri C e Ls sulle prestazioni dei filtri passa alto - Funzionamento monopolare .....	147
Grafico 44 - Influenza dei parametri $C_{1_d}$ e Ls sulle prestazioni dei filtri ad accordo doppio – Funzionamento bipolare .....	148
Grafico 45 - Influenza dei parametri $C_{1_d}$ e Ls sulle prestazioni dei filtri ad accordo doppio – Funzionamento monopolare .....	148

---

## ABSTRACT

In qualunque impianto di trasmissione di energia elettrica in alta tensione (HVDC) sono presenti filtri – installati lato AC e lato DC – atti a ridurre l'entità delle correnti armoniche generate dalle valvole nelle stazioni di conversione. Per quanto riguarda il lato in continua, la necessità di diminuire l'ampiezza di queste componenti pulsanti è correlata con l'esigenza di limitare le interferenze indotte per accoppiamento elettromagnetico fra conduttori di potenza e impianti di telecomunicazione circostanti. La quantificazione di questi disturbi nell'ambito dei sistemi HVDC avviene mediante il calcolo di uno specifico parametro, la corrente perturbata equivalente.

In questa tesi si presenta e sviluppa un metodo di recente proposta per definire i requisiti armonici da rispettare, la cui peculiarità e punto di forza è quello di avere carattere generale e di poter quindi essere utilizzato per qualunque impianto. Si descrive ed implementa inoltre il cosiddetto *modello a tre impulsi* dei convertitori elettronici, utilizzato in questo ambito in quanto permette una corretta rappresentazione delle armoniche di correnti presenti. Si effettuano quindi simulazioni in ambiente Matlab Simulink su un impianto preso come riferimento (3000 MW,  $\pm 500$  kV) al fine di individuare un insieme di filtri che rispetti i requisiti armonici indicati. Come risultato finale, si analizzano le sensibilità dei risultati nei confronti di diversi parametri al fine di stabilire quali siano quelli che maggiormente influiscono sulle prestazioni dei filtri, quindi su quali aspetti occorrerà maggiormente concentrarsi ponendosi nell'ottica di un costruttore di impianti HVDC.

*In any high voltage direct current project (HVDC) there are harmonic filters - installed both on AC and DC side – which aim to reduce the magnitude of the harmonic currents generated by the valves in the converter stations. On the DC side the need to cut the alternating components is related to the interference induced by electromagnetic coupling between the power conductors and telecommunications installations all-surrounding, which has to be reduced. The quantification of these disturbances in the context of HVDC systems is assessed by a specific parameter, which is called equivalent disturbing current.*

*This thesis presents and develops an innovative method in order to define the harmonic limits which have to be satisfied. This method can be used for any plant. This text also describes and implements the so-called three pulse model of the electronic converters. This model is always used in this context because it allows to draw up a correct representation of all the harmonic currents generated by the converters. In order to identify a set of filters that meet the requirements, a number of simulations have been made (using Matlab Simulink) on a plant taken as reference (3000 MW,  $\pm 500$  kV). As a final result, the outcomes' sensitivities referring to various parameters have been tested in order to define which ones of them are able to affect the most the performance, therefore to help the HVDC system's manufacturers in better focusing their attention.*

# 1 INTRODUZIONE

A partire dagli anni '50 del secolo scorso si sono diffusi nel mondo impianti di trasmissione di energia elettrica in corrente continua. Essi vanno via via assumendo un'importanza crescente, specie nei grandi Paesi che stanno conoscendo negli ultimi decenni un boom economico rilevante: si pensi alle nuove superpotenze asiatiche – la Cina e l'India – e al Brasile. Questi stati sono accomunati da una crescente domanda di energia elettrica per usi sia civili che industriali, e dalla conseguente necessità di trasportare l'energia prodotta da grandi centrali situate nell'entroterra (impianti nucleari o idroelettrici) per centinaia se non migliaia di chilometri verso le città costiere, minimizzando le perdite. Per queste applicazioni la corrente continua ha prestazioni migliori rispetto ai tradizionali sistemi in corrente alternata.

Tra i diversi componenti di un impianto di trasmissione di corrente continua in alta tensione (comunemente noto come HVDC, acronimo dell'inglese *High Voltage Direct Current*) si annoverano i filtri, che vengono installati sia sul lato in alternata che su quello in continua delle stazioni di conversione. Esse, avendo al loro interno ponti costituiti da valvole elettroniche, producono grandi quantitativi di correnti armoniche: scopo dei sistemi di filtraggio è per l'appunto quello di limitare queste correnti e in particolare di contenerne gli effetti dannosi.

In questa tesi ci si è concentrati sull'analisi dei sistemi di filtraggio che vengono installati sul lato in corrente continua delle stazioni di conversione. La corrente che percorre i conduttori di polo è solo in prima approssimazione continua: alla componente costante sono sovrapposte una serie di componenti alternate a frequenze diverse. Al fine di ridurre il quantitativo di queste correnti pulsanti occorre installare un reattore di spianamento – che livelli per quanto possibile la corrente in uscita dai convertitori – e per l'appunto dei filtri, coordinati con esso, il cui scopo è quello di fornire alle correnti prodotte in seguito all'azione di commutazione delle valvole dei ponti delle vie di richiusura (costituite da rami opportunamente dimensionati) alternative ai conduttori di polo.



Un aspetto particolarmente significativo connesso con la presenza di queste componenti alternate di corrente sul lato in continua degli impianti HVDC è associata ai disturbi che esse – per accoppiamento elettromagnetico – possono indurre su impianti (di telecomunicazione o di altro genere, si pensi ad esempio ai sistemi ferroviari) che si trovano nelle zone limitrofe al tracciato della linea in alta tensione.

Negli ultimi decenni si è consolidato un metodo – che è ancora oggi quello utilizzato in ambito industriale per la progettazione ed il dimensionamento dei sistemi di filtraggio lato DC – che ruota appunto attorno al contenimento di questi disturbi indotti: esso si basa sul calcolo di un parametro caratteristico, la *corrente perturbata equivalente*, che quantifica in maniera rapida ed efficace i disturbi indotti nelle linee di telecomunicazione adiacenti l'impianto HVDC dalle correnti armoniche circolanti in esso. Scopo del sistema di filtraggio lato continua è quello di garantire che questo parametro si mantenga al di sotto di un determinato limite, quindi di ridurre a valori considerati accettabili le interferenze indotte.

Obiettivo di questa tesi è quello di indagare l'esistenza o meno in letteratura di metodi per stabilire in maniera univoca il valore di questi limiti; in seguito, di sviluppare un software – in ambiente Matlab Simulink – in grado di valutare le prestazioni in varie condizioni di funzionamento dell'impianto di diverse famiglie di filtri, al fine di individuarne un certo numero avente prestazioni armoniche accettabili. Da ultimo, condurre analisi per identificare quali fattori abbiano un maggiore impatto nel determinare le prestazioni dei filtri stessi e quindi quali siano i parametri di maggiore importanza nella scelta e nel dimensionamento del sistema di filtraggio.

## 2 STATO DELL'ARTE

### 2.1 I sistemi HVDC

A partire dagli anni '50 del XX secolo si sono iniziati a diffondere nel mondo gli impianti di trasmissione dell'energia elettrica ad alta o altissima tensione in corrente continua (HVDC, dall'inglese High Voltage Direct Current).

I motivi per i quali è stato necessario passare in alcune circostanze dalla trasmissione classica in corrente alternata a quella in corrente continua sono i seguenti:

- Assorbimento di correnti a vuoto troppo elevate (superiori alle portate dei cavi) in impianti in cavo che superano le lunghezze indicative di 80 km per tensioni di 220 kV e 50 km per tensioni di 380 kV.
- Instabilità dell'interconnessione fra due reti, in funzione della potenza di scambio e della lunghezza del collegamento, nonché della tensione agli estremi e delle caratteristiche elettriche della linea.

Nell'impianto UHVDC (*Ultra High Voltage Direct Current*) Rio Madeira in Brasile (entrato in servizio nel 2013) si è raggiunto un valore di potenza trasmessa di 7100 MW con una linea lunga 2375 km [1]. Il valore di 7.1 GW rappresenta allo stato attuale la massima capacità trasmissibile da qualunque impianto di trasmissione di energia elettrica, sia in continua che in alternata.

#### 2.1.1 Vantaggi e svantaggi della trasmissione in continua

Sono riportati di seguito una serie di vantaggi della trasmissione in corrente continua rispetto a quella in corrente alternata:

- + Natura asincrona della trasmissione, che consente qualunque regolazione della potenza di scambio e variazioni della frequenza sulle reti interconnesse (quindi anche la connessione fra reti alternate tra loro asincrone).

- 
- + Capacità di trasmissione limitata unicamente dai limiti termici dei conduttori e non dai requisiti di potenza reattiva.
  - + Mancanza di effetto pelle, quindi sfruttamento dell'intera sezione dei conduttori.
  - + Mancato assorbimento di correnti capacitive da parte della linea.
  - + Minor costo della linea, dovuto alla mancanza dell'effetto pelle (a pari sezione del conduttore, la portata in corrente continua è maggiore) e al fatto che non è necessario avere un numero di conduttori multiplo di tre.
  - + Ridotto o nullo contributo alle correnti di corto circuito.
  - + Minore ingombro dei collegamenti aerei e dei loro sostegni, che porta ad un minore impatto visivo e a minori costi per l'occupazione dello spazio.
  - + Maggior vantaggio economico per le trasmissioni su lunghe distanze, dovuto alle minori perdite in linea<sup>1</sup>.
  - + Minor effetto corona e minori radiodisturbi delle linee di trasmissione in continua rispetto a quelle in alternata.

Per contro, gli HVDC presentano i seguenti svantaggi:

- Necessità di assorbire dai nodi in corrente alternata potenza reattiva (qualora non sia sufficiente quella prodotta dai filtri lato AC).
- Mancanza di apparecchi di interruzione per la corrente continua (per alte/altissime tensioni) e conseguente difficoltà nella realizzazione di reti multiterminali.
- Elevato costo delle stazioni di conversione e loro ingombro.

Un parametro importante è la cosiddetta lunghezza critica, la lunghezza del collegamento oltre la quale la trasmissione in corrente continua è economicamente più vantaggiosa rispetto a quella in corrente alternata: attualmente questo valore limite è pari a 800 km per le linee aeree e 40-100 km per quelle in cavo.

Rispetto alla trasmissione in alternata, gli HVDC hanno maggiori costi fissi per quanto riguarda le stazioni di conversione, ma minori costi di esercizio (le perdite in linea sono

---

<sup>1</sup> Come noto, una linea ad N conduttori in corrente alternata (operante con un angolo di sfasamento  $\phi$ ) ha perdite rispetto ad una linea in continua con n conduttori che stanno in rapporto  $\frac{N \cos \phi}{n}$ : aggiungendo le perdite della stazione di conversione (che si possono assumere all'incirca pari al 0.6% della potenza trasmessa [2]) si ha - a parità di potenza trasmessa - che le perdite di un impianto HVDC sono inferiori a quelle di un impianto in corrente alternata (se la lunghezza del collegamento supera un certo valore).

minori) nonché minori costi fissi limitatamente alle linee (sia per quanto riguarda i conduttori, sia perché non occorre rifasare in linea come invece spesso accade per lunghe linee in alternata): da qui deriva l'esistenza della lunghezza limite.

Una valutazione economica di massima può essere fatta osservando la figura seguente, dove è evidenziata la distanza di break even (ossia la lunghezza del collegamento sopra la quale la soluzione in corrente continua è da preferirsi a quella in alternata).

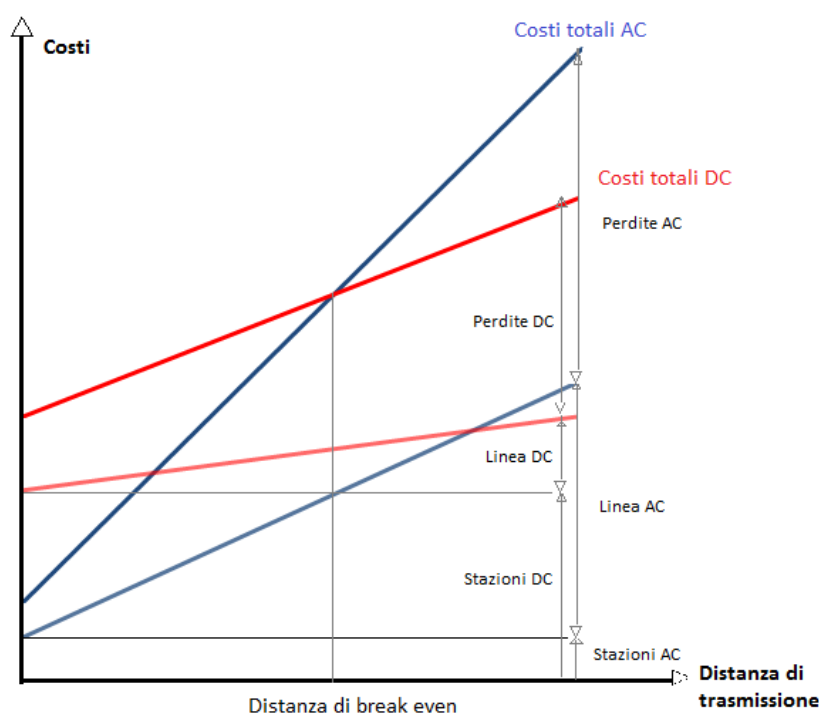


Grafico 1 - Confronto economico HVDC vs. corrente alternata

### 2.1.2 Struttura di un impianto HVDC

Gli impianti più recenti sono del tipo bipolare, rappresentato nella figura seguente. La scelta della struttura bipolare del collegamento permette di aumentare l'affidabilità: in caso di fuori servizio di un ponte di conversione o (in alcuni casi) di un conduttore, opportune riconfigurazioni dell'impianto permettono di continuare a trasmettere potenza (seppur solo una frazione della nominale).

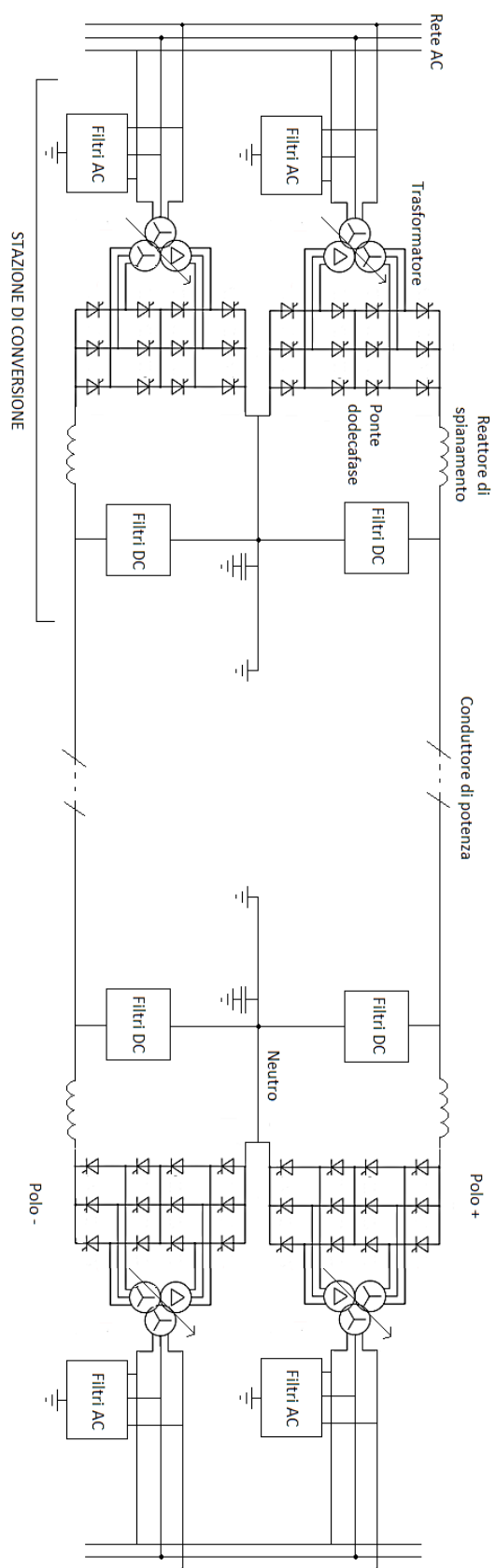


Figura 1 - Schema complessivo di un impianto HVDC bipolare

In essa si notano gli elementi principali di un impianto HVDC:

- trasformatori a rapporto variabile lato reti AC (per ciascun ponte dodecafase, vi possono essere un unico trasformatore trifase a tre avvolgimenti, due trasformatori trifase a due avvolgimenti, tre trasformatori monofase a tre avvolgimenti oppure sei trasformatori monofase a due avvolgimenti). La fotografia seguente mostra un trasformatore da 235 MVA destinato al collegamento Australia – Tasmania (fonte: [www.siemens.com](http://www.siemens.com))

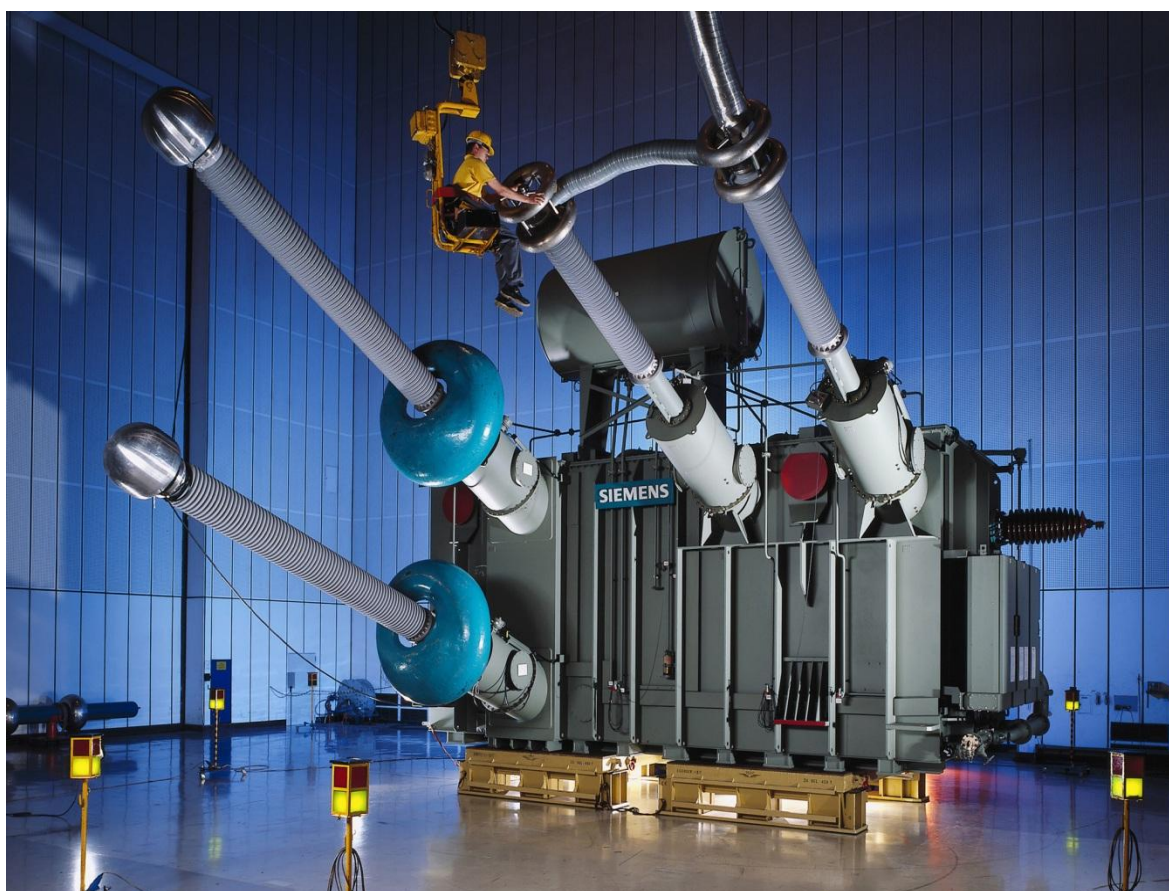


Figura 2 - Trasformatore da 235 MVA per impianto HVDC

- due ponti a reazione dodecafase per ciascun terminale del collegamento. I ponti sono costituiti per quanto riguarda gli impianti di potenza maggiore (saranno quelli considerati in questa tesi) da rami di tiristori al silicio, sono quindi intrinsecamente unidirezionali (la corrente non si può invertire: per scambiare il flusso di potenza è necessario invertire la tensione agendo sul controllo di fase dei tiristori). Il ponte a

reazione dodecafase (costituito dalla serie di due ponti a reazione esafase sfasati fra di loro di  $\pm 30^\circ$ ) viene utilizzato in quanto il contenuto armonico da esso generato è minore rispetto al ponte di Graetz singolo. Nella figura seguente (fonte: [www.abb.co.uk](http://www.abb.co.uk)) si possono vedere alcuni di questi rami di valvole.



Figura 3 - Rami a valvole di un impianto HVDC

- reattore di spianamento, la cui funzione verrà descritta dettagliatamente nel seguito. La fotografia seguente mostra il reattore di spianamento per l'impianto North East – AGRA da 800 kV in fase di test (fonte: [www.trenchgroup.com](http://www.trenchgroup.com))





Figura 4 - Reattore di spianamento da 800 kV in fase di test

- filtri lato AC e lato DC, per ridurre il contenuto armonico presente rispettivamente sul lato in alternata e in continua, aventi anche lo scopo – per quanto concerne i filtri lato alternata – di fornire la potenza reattiva necessaria al funzionamento del convertitore. I filtri sono costituiti da circuiti contenenti elementi induttivi e capacitivi risonanti, con topologie diverse. Si rimanda al paragrafo 2.3.2 per una trattazione dettagliata delle diverse tipologie di filtro utilizzate negli impianti HVDC. Del sistema di filtraggio (lato corrente continua) fa parte anche il condensatore di neutro che si può notare nello schema: per la descrizione della sua utilità si rimanda al paragrafo ad esso dedicato.
- conduttori - che costituiscono la linea di trasmissione. La figura 5 mostra la linea aerea dell'impianto HVDC Leyte - Luzon (fonte:www.jcmiras.com ).





Figura 5 - Linea aerea dell'impianto HVDC Leyte - Luzon (Filippine)

Sono inoltre presenti interruttori (sul lato in continua – non essendovi allo stato attuale interruttori in grado di aprire correnti continue dell'ordine di grandezza delle correnti di polo – sono installati solo sulla sezione di neutro: qui vi sono anche dispositivi di manovra, necessari per passare da una modalità di funzionamento all'altra), scaricatori di sovratensione e altri dispositivi di protezione e controllo (innanzitutto quelli adibiti al comando delle valvole).

Negli impianti moderni è sempre prevista la messa a terra del punto centrale di almeno una delle due stazioni di conversione, per consentire il coordinamento dell'isolamento e ridurre i costi dell'impianto: qualora siano collegate a terra entrambe le stazioni di conversione, inoltre, si rende possibile in condizioni di emergenza (guasto ad un ponte oppure a un conduttore) il funzionamento unipolare a potenza ridotta (intorno al 50% della nominale). In condizioni di funzionamento bipolare, il ritorno via neutro – se presente – è caricato dalla sola corrente di sbilanciamento. Il funzionamento monopolare può avvenire invece con ritorno via elettrodi (e richiusura via terra o mare) o per via metallica (mediante

---

conduttore dedicato oppure usando uno dei poli del collegamento). L'elettrodo di messa a terra è generalmente posto a 10 – 50 km dalla stazione di conversione.

## 2.2 Le armoniche nei sistemi HVDC

Come già accennato, componente fondamentale (nonché particolarmente ingombrante) di un impianto HVDC sono i filtri, presenti sia lato corrente alternata che lato corrente continua. La loro presenza è necessaria in quanto la stazione di conversione - come tutte le apparecchiature elettroniche - “inquina” iniettando in rete e in linea armoniche di ampiezza non trascurabile: scopo dei filtri è quello di ridurre a valori accettabili questo contenuto armonico, per mantenere una sufficiente power quality nella rete AC interconnessa e per limitare le interferenze che eventuali armoniche lato DC generano su impianti di telecomunicazione adiacenti al collegamento di potenza dell'HVDC.

Un sistema HVDC funziona in condizioni ideali se sussistono le seguenti condizioni:

1. Tensioni alternate sinusoidali, trifasi e bilanciate
2. Corrente lato continua costante (senza ripple)
3. L'impedenza interna del convertitore è nulla se vista dal lato DC, e infinita se vista dal lato AC
4. Le correnti armoniche si richiudono unicamente nel circuito principale, senza vie di richiusura a terra
5. La reattanza del trasformatore è identica per le tre fasi e lineare
6. Sistema di controllo perfetto (senza variazioni negli istanti di accensione delle valvole)

Se tutte queste condizioni sussistono, i convertitori HVDC si comportano come sorgenti di correnti armoniche di ordine  $np \pm 1$  lato alternata, e di tensioni armoniche di ordine  $np$  lato continua, con  $p$  pari al numero di impulsi del convertitore<sup>2</sup>, e  $n$  numero intero.

---

<sup>2</sup> 'n' vale 12 nel caso tipico di ponti dodecafasi.

---

Generalmente si modella il convertitore nella maniera seguente:

- come un generatore di correnti armoniche sul lato AC.
- come un generatore di tensioni armoniche lato DC.

Focalizzandosi sul lato DC del convertitore, si definiscono “armoniche caratteristiche” quelle di ordine  $np$ , ossia quelle che come detto vengono generate anche in un funzionamento “ideale” del sistema.

Nei casi reali, tuttavia, non ci si può limitare a considerare queste armoniche: misure realizzati su diversi impianti in esercizio hanno dimostrato come il contenuto armonico sia maggiore di quello ideale; in particolare, si è verificata la presenza di armoniche multiple di 3 di ampiezza non nulla e anzi anche dello stesso ordine di grandezza di quelle caratteristiche, la cui presenza non può essere spiegata col modello classico del convertitore AC\DC nemmeno introducendo in esso sbilanciamenti e/o imperfezioni nel sistema di comando dei tiristori<sup>3</sup>. Questo è dovuto soprattutto al fatto che, se le ipotesi 1-2-3-5-6 di cui sopra sono solitamente poco distanti da quanto si verifica nella realtà, lo stesso non si può dire per quanto riguarda l’ipotesi 4: le correnti armoniche si richiudono anche a terra attraverso le capacità di dispersione degli elementi che costituiscono la stazione di conversione e questo genera nuove componenti armoniche nella tensione lato continua, in aggiunta a quelle caratteristiche: esse vengono chiamate “non caratteristiche”. Per rappresentare correttamente queste “nuove” armoniche, a partire dagli anni '80 si è introdotto – nello studio dei sistemi HVDC – il cosiddetto “modello a tre impulsi”, che verrà ampiamente descritto nel paragrafo 3.1.

La generazione di armoniche non caratteristiche è dovuta – seppur in misura minore - anche al fatto che le ipotesi 1-2-3-5-6 di cui sopra non siano mai verificate esattamente (specialmente per quanto riguarda le impedenze dei trasformatori, esse non sono mai perfettamente uguali nelle tre fasi). Inoltre, bisogna aggiungere che in un sistema non perfettamente bilanciato possono comparire componenti armoniche di qualunque ordine, sia lato AC che lato DC.

---

<sup>3</sup> Si intende contenuto armonico complessivo: come noto, alcuni fattori di non idealità (es. la commutazione non istantanea delle valvole del ponte) diminuiscono l’ampiezza delle correnti alle armoniche caratteristiche. Considerando però la presenza di tutte le armoniche non caratteristiche multiple di 3 il contenuto armonico complessivo nel caso reale aumenta rispetto a quello ideale.

In ogni caso, qualunque componente armonica di tensione presente provoca la circolazione di correnti alternate ad alta frequenza sovrapposte alla componente continua, che generano una serie di problemi che il filtraggio è chiamato a risolvere.

Non si pensi che in un impianto HVDC i filtri siano un elemento secondario: sia per quanto riguarda l'ingombro fisico, sia per quanto concerne il loro costo, assumono anzi un ruolo centrale. Basti pensare che in una stazione di conversione, una porzione considerevole dello spazio (fino ad arrivare alla metà) è occupato dai filtri (AC e DC)<sup>4</sup> e che essi impattano per il 10 – 15% del costo complessivo della stazione stessa [3].

L'immagine seguente (fonte: [www.abb.co.uk](http://www.abb.co.uk)) riporta la vista aerea della stazione di conversione sita a Longquan, in Cina. Evidenziate sono le aree occupate dai filtri AC (rosso) e DC (blu).

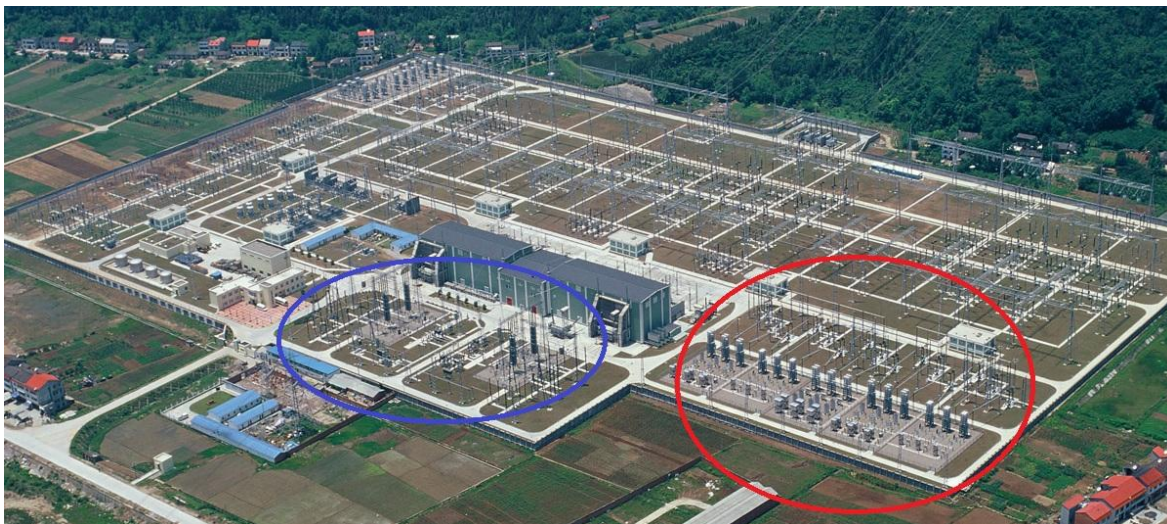


Figura 6 - Stazione di conversione di Longquan

---

<sup>4</sup> Come esempio, si riportano le altezze dei condensatori utilizzati nei filtri: 35 m se con tensione nominale di 800 kV, 20 m per tensioni di 500 kV.

## 2.3 Sistema di filtraggio lato DC

La riduzione a valori accettabili delle componenti armoniche presenti sul lato in corrente continua di un impianto HVDC è garantita dall'azione combinata dei seguenti elementi impiantistici: il reattore di spianamento e i filtri.

### 2.3.1 Reattore di spianamento

Il reattore di spianamento è un elemento fondamentale e sempre presente in qualunque impianto HVDC.

Esso ha un ruolo primario nell'abbattimento delle componenti pulsanti della corrente lato continua, quindi non si può prescindere da esso quando si parla di filtraggio DC.

Il reattore di spianamento può essere isolato ad olio oppure ad aria, ha nella maggior parte dei casi [4] (per quanto riguarda gli impianti destinati alla trasmissione di potenza su lunghe distanze) un valore di induttanza compreso fra i 100 e i 300 mH ed è inserito in serie al collegamento di potenza in continua. Il suo ingombro è notevole, basti pensare che il peso di un reattore di spianamento isolato ad aria può arrivare con i materiali e le tecnologie attuali alle 50 tonnellate.

Le funzioni del reattore di spianamento sono molteplici:

- Scongiurare il rischio di avere conduzione intermittente ai bassi carichi<sup>5</sup> (essa potrebbe portare a sovratensioni inaccettabili nel trasformatore e nel reattore stesso).
- Limitazione delle correnti di corto circuito lato DC (e della pendenza dei loro fronti di salita), al fine di evitare danneggiamenti delle valvole.
- Evitare che lato DC vi siano risonanze alle armoniche di ordine inferiore.
- Riduzione del ripple della corrente raddrizzata.

---

<sup>5</sup> Generalmente, si considera che la potenza trasmessa possa calare fino al 10% della potenza nominale.

Il valore medio del ripple di corrente ( $I_d$ ) per un ponte a reazione dodecafase può essere valutato utilizzando la formula empirica seguente, dove con  $V_{do}$  è indicata la tensione continua a vuoto ed  $L_s$  è l'induttanza del reattore di spianamento [5]:

$$I_d = \frac{V_{do}}{L_s} (0.023 \sin \alpha)^6 \quad (2.1)$$

### 2.3.2 Filtri DC:

I filtri destinati alla rimozione delle armoniche sono costituiti da elementi induttivi e capacitivi risonanti, collegati a un polo del collegamento in continua.

A seconda di quante siano le armoniche che il filtro (idealmente) elimina (ossia quante siano le frequenze di risonanza tra gli elementi del filtro stesso), si parla di accordo singolo, doppio o triplo.

#### 2.3.2.1 Filtro ad accordo singolo

La struttura più semplice, nonché la prima ad essere stata implementata, è quella del filtro a singolo accordo: costituito da due elementi collegati in serie, è accordato su una sola frequenza armonica.

L'impedenza nel dominio di Laplace assume la forma seguente:

$$Z_{singolo}(s) = \frac{1+s^2 L_a C_a}{s C_a} \quad (2.2)$$

mentre la frequenza di risonanza è pari a

$$f_{ris} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_a L_a}} \quad (2.3)$$

Nella figura 7 è rappresentata la struttura di un filtro ad accordo singolo ideale<sup>7</sup> accordato alla dodicesima armonica e la sua impedenza in funzione della frequenza.

---

<sup>6</sup> In questa formula, il coefficiente 0.023 non è adimensionale, bensì ha le dimensioni di un tempo [s].

<sup>7</sup> Si parla di filtro ideale in quanto si trascurano i termini resistivi che modellizzano le perdite ohmiche.

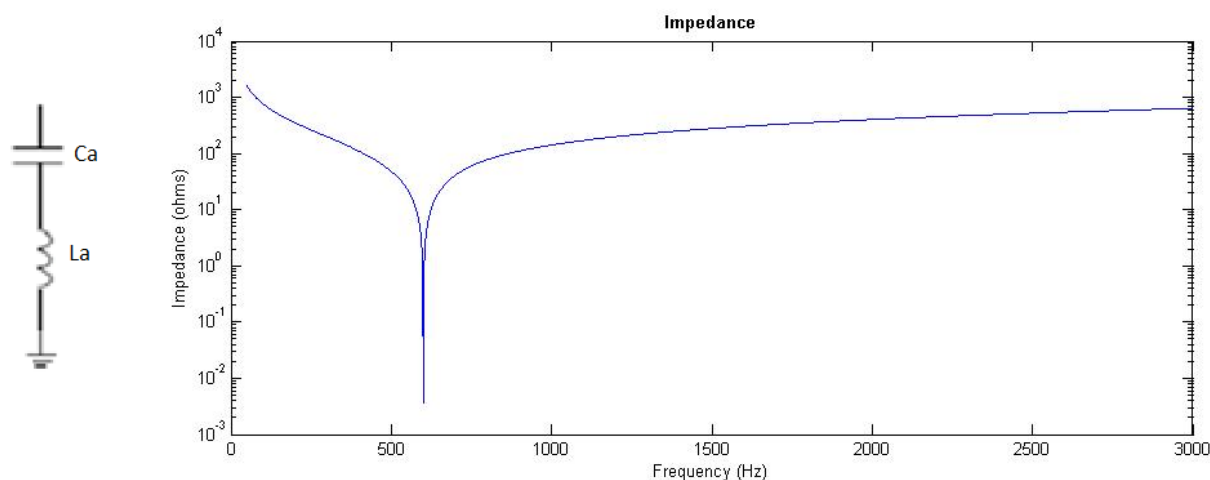


Figura 7 - Struttura e andamento in frequenza dell'impedenza di un filtro ad accordo singolo

Il filtro ad accordo singolo – ormai non più utilizzato nella pratica – è molto utile in quanto qualunque tipo di filtro può essere ricondotto ad un insieme di filtri di questo tipo<sup>8</sup>. Il vantaggio che si ha nell'utilizzare un solo filtro ad accordo multiplo al posto di più filtri ad accordo singolo è sostanzialmente il fatto di poter utilizzare nei primi solamente due elementi (uno capacitivo ed uno induttivo) isolati per l'alta tensione – con evidenti risparmi in termini di ingombro ed investimenti.

#### 2.3.2.2 Filtro passa alto

Il filtro passa alto può essere considerato un'evoluzione del filtro ad accordo singolo: anch'esso è costituito da un induttore e un condensatore, ai quali si aggiunge però una resistenza posta in parallelo all'induttore. Anche in questo caso l'andamento in frequenza dell'impedenza assume un valore minimo in corrispondenza della frequenza di risonanza, la differenza è però il comportamento alle alte frequenze, che permette un migliore assorbimento delle correnti armoniche.

L'impedenza nel dominio di Laplace assume la forma seguente:

$$Z_{passa\ alto}(s) = \frac{1+sL_a+s^2L_aC_aR_a}{sC_a(sL_a+R_a)} \quad (2.4)$$

<sup>8</sup> Questa equivalenza vale fintantoché si considerano filtri ideali – ossia senza elementi dissipativi.

Nella figura seguente è rappresentata la struttura di un filtro passa alto e la sua impedenza in funzione della frequenza.

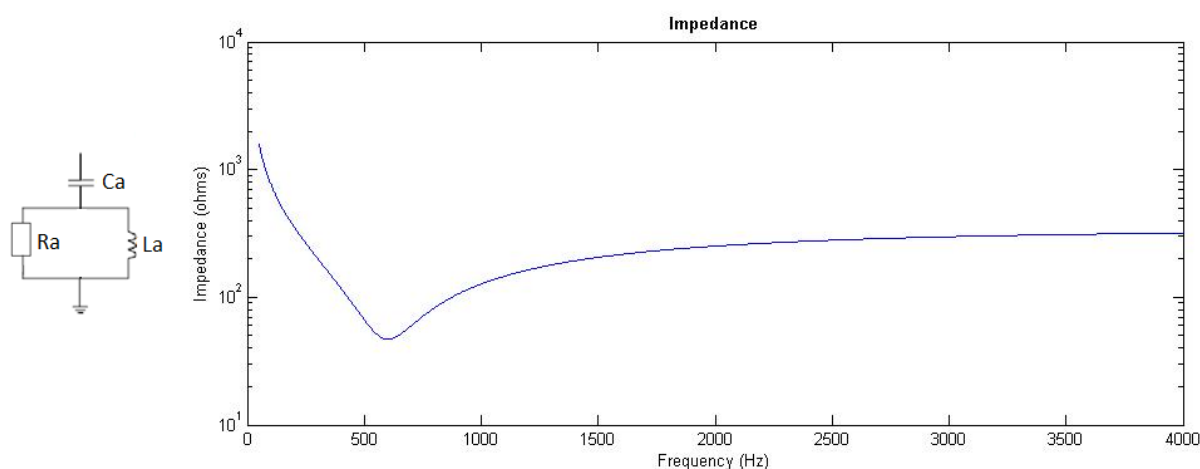


Figura 8 - Struttura e andamento in frequenza dell'impedenza di un filtro passa alto

### 2.3.2.3 Filtro ad accordo doppio

Un filtro ad accordo doppio ha lo scopo di eliminare le componenti armoniche alle due frequenze alle quali è accordato.

L'impedenza del filtro nel dominio di Laplace assume la forma seguente:

$$Z_{doppio}(s) = \frac{sL_2R_2}{sL_2+R_2+s^2L_2C_2R_2} + sL_1 + \frac{1}{sC_1} \quad (2.5)$$

Le frequenze di risonanza del filtro corrispondono agli zeri positivi della funzione  $Z_{doppio}(s)$  scritta sopra: esse sono pari a

$$f_{ris-1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{C_1^2L_1^2 + 2C_1^2L_1L_2 + C_1^2L_2^2} - 2C_1C_2L_1L_2 + 2C_1C_2L_2^2 + C_2^2L_2^2}{2C_1C_2L_1L_2} + C_1L_1 + C_1L_2 + C_2L_2} \quad (2.6)$$

$$f_{ris-2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1L_1 - \sqrt{C_1^2L_1^2 + 2C_1^2L_1L_2 + C_1^2L_2^2} - 2C_1C_2L_1L_2 + 2C_1C_2L_2^2 + C_2^2L_2^2}{2C_1C_2L_1L_2} + C_1L_2 + C_2L_2} \quad (2.7)$$

Nella figura seguente è rappresentata la struttura di un filtro a doppio accordo e un possibile andamento della sua impedenza in funzione della frequenza



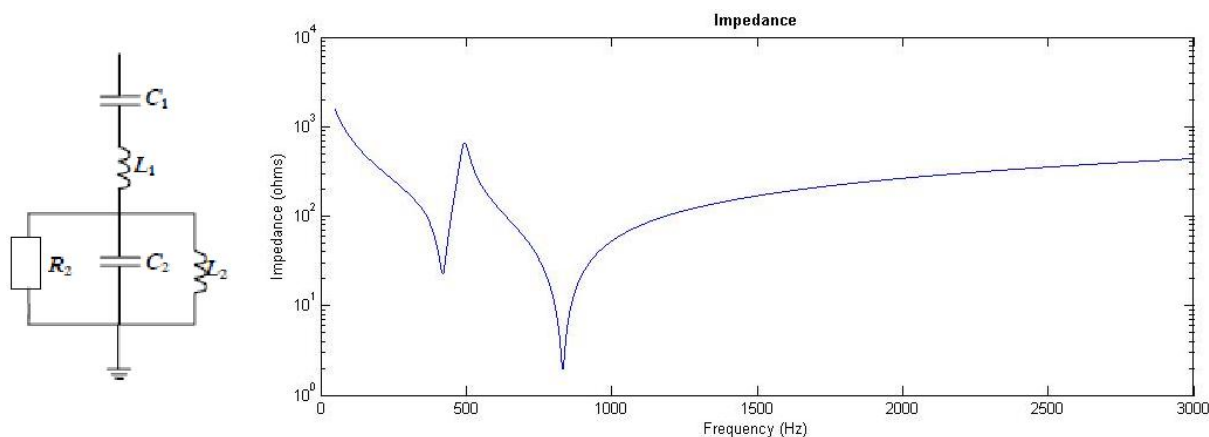


Figura 9 - Struttura e andamento in frequenza dell'impedenza di un filtro ad accordo doppio

Le prestazioni di qualsiasi filtro ad accordo doppio ideale – ossia in cui non si consideri il parametro  $R_2$  - possono essere uguagliate da quelle di due filtri ad accordo singolo. Utilizzando i simboli della figura seguente, appare evidente come le frequenze di risonanza siano pari a  $f_{ris1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_a L_a}}$ ,  $f_{ris2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_b L_b}}$ . I parametri del filtro a doppio accordo si possono calcolare mediante equivalenze circuitali anche a partire da quelli dei due filtri fittizi ad accordo singolo mediante le formule seguenti.

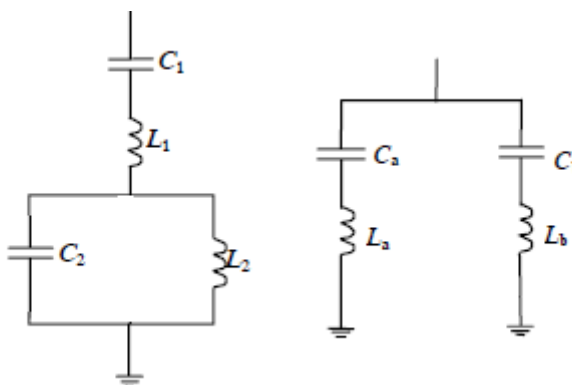


Figura 10 - Equivalenza tra un filtro ad accordo doppio e due filtri ad accordo singolo

$$\begin{aligned}
 C_1 &= C_a + C_b & L_1 &= \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \\
 C_2 &= \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(C_a L_a - C_b L_b)^2} & L_2 &= \frac{(C_a L_a - C_b L_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Per la dimostrazione delle formule (2.8) si rimanda all'appendice 1.

### **3 INTERFERENZE CAUSATE DAL COLLEGAMENTO HVDC AI SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE ADIACENTI**

In questo capitolo si presentano due metodi (quello della tensione di rumore indotta e quello della corrente perturbata equivalente) che storicamente sono stati utilizzati per valutare l'entità dei disturbi indotti dall'impianto HVDC alle linee di comunicazione adiacenti. In particolare si focalizzerà l'attenzione sul criterio della corrente perturbata equivalente, in quanto è il metodo oggi utilizzato dai progettisti di impianti HVDC per valutare le prestazioni armoniche lato corrente continua. Esso è stato sviluppato in un periodo (anni '80 del secolo scorso) nel quale le comunicazioni telefoniche avvenivano per via analogica: gli spettri di frequenze considerate ricalcano questo fatto. Oggi come noto si sta sempre più diffondendo la fibra ottica come mezzo per le comunicazioni su lunghe distanze; essa non soffre di disturbi nello stesso spettro di frequenze dei doppi in rame utilizzati nelle comunicazioni analogiche, avvenendo lo scambio di informazioni per via digitale. Questo non deve però far pensare che il metodo qui descritto sia superato e non attuale: molteplici fonti indicano la corrente perturbata equivalente come unico metodo di quantificazione dei disturbi indotti, non solo lo Standard IEEE che tratta di queste tematiche (riaffermato nel 2010 e tutt'ora in vigore [6]) ma anche articoli e documenti tecnici redatti dai produttori di impianti HVDC [3]. Non da ultimo, come conferma della bontà del metodo si può evidenziare come il già citato impianto brasiliano Rio Madeira (progettato da ABB ed entrato in servizio nel 2013, che può considerarsi lo stato dell'arte per quanto riguarda gli impianti di trasmissione in corrente continua) abbia utilizzato la corrente perturbata equivalente come metodo per dimensionare i filtri lato DC, al pari di tutti gli altri impianti entrati in esercizio nell'ultimo decennio [7]. In aggiunta a ciò si può sottolineare come l'unica pubblicazione che parli di fibre ottiche e HVDC non metta in discussione il metodo, ma parli semplicemente della possibilità di utilizzare in futuro limiti leggermente più elevati rispetto al passato [8]. Tutte queste conferme – unite

al fatto che nessuna pubblicazione IEEE indichi metodologie differenti – rendono giustizia al metodo che verrà ora descritto. E' possibile che in futuro questo metodo possa subire variazioni o essere sostituito, ma allo stato attuale non esistono altre modalità di valutazione delle prestazioni dei filtri lato DC. Una possibile spiegazione di questo fatto è un *excess inertia* da parte dei costruttori, che non corrono il rischio di abbandonare un metodo con il quale si sono progettati per anni impianti che non hanno dato origine a particolari problemi, con costi ragionevoli: si sottolinea come l'aspetto economico in impianti di queste dimensioni sia di primaria importanza.

### 3.1 Il meccanismo fisico delle interferenze

A causa dell'ondulazione introdotta dai convertitori e dalle dissimmetrie, le grandezze lato DC in un collegamento HVDC sono caratterizzate da un contenuto armonico non nullo. Queste armoniche causano interferenze (per induzione elettromagnetica longitudinale<sup>9</sup>) con sistemi di comunicazione posti nelle vicinanze: le componenti armoniche, quindi alternate, che scorrono nei conduttori del circuito di potenza creano campi magnetici che inducono tensioni - anch'esse alternate - in altri conduttori posti nelle vicinanze (nel nostro caso, considereremo come influenzati da questi campi magnetici i soli conduttori facente parte di sistemi di comunicazione).

La tensione indotta è correlata alla corrente armonica mediante la mutua impedenza  $Z_m$  (variabile con la frequenza) secondo la formula

$$V_{cn} = \left( \sum_{j=1}^k I_{jn} Z_{mjn} \right) \quad (3.1)$$

dove

$V_{cn}$  è la tensione di modo comune all'armonica n

n è l'ordine di armonicità

---

<sup>9</sup> Si trascurano generalmente i fenomeni di induzione elettrostatica in quanto i moderni circuiti di comunicazione sono di fatto insensibili a questo fenomeno.

- 
- $k$  è il numero dei conduttori del collegamento HVDC
- $I_{jn}$  è la corrente nel conduttore  $j$ -esimo all'armonica  $n$ -esima
- $Z_{mjin}$  è la mutua impedenza tra il conduttore  $j$  e il conduttore del circuito di comunicazione (all'armonica  $n$ -esima).

Questa tensione indotta (detta “tensione longitudinale”) non è la reale tensione che causa l'interferenza, per tre motivi:

- I moderni circuiti di comunicazione sono costituiti da un conduttore di andata e uno di ritorno: la tensione da valutare è la differenza tra le tensioni longitudinali indotte in ciascuno dei due conduttori: questa tensione è detta tensione trasversale ed è data dal prodotto della tensione longitudinale per il fattore di bilanciamento longitudinale  $B_m$ .
- I cavi sono schermati per ridurre l'effetto di interferenze esterne: la conseguenza di questa schermatura è di ridurre la tensione indotta in quantità pari al fattore di schermatura  $K_m$  (dipendente dalla frequenza). Si osserva quindi che il problema delle interferenze è molto più sentito per le linee di comunicazione aeree<sup>10</sup> piuttosto che per i cavi: le prime infatti non hanno alcuna schermatura intrinseca.
- Non tutte le componenti armoniche “disturbano” allo stesso modo: la banda di frequenze utilizzate per la comunicazione telefonica è generalmente compresa tra i 300 e i 3000 Hz, e all'interno di questo intervallo l'orecchio umano è sensibile ad alcune frequenze più che altre. La relazione tra una componente armonica e il suo effetto disturbante sulla comunicazione telefonica è dato dal cosiddetto *C-message factor*<sup>11</sup>, i cui valori sono riportati nella tabella e nella figura seguenti [5-9]. Nel calcolo dei disturbi indotti, ciascuna componente di corrente è moltiplicata per il valore di C factor corrispondente alla propria frequenza. Da un'osservazione della figura si nota come siano le componenti a frequenze comprese tra gli 800 e i 1500 Hz quelle più problematiche.

---

<sup>10</sup> Al giorno d'oggi, in realtà, le linee telefoniche aeree sono sempre più rare.

<sup>11</sup> Il C factor è storicamente il parametro utilizzato nell'ambito della valutazione dei disturbi causati da impianti HVDC, ed è stato introdotto negli Stati Uniti: in altre applicazioni quali la valutazione dei disturbi indotti dalle linee ferroviarie elettrificate si preferisce utilizzare il fattore psfometrico, di “origine” europea.

Frequenza	Ordine di armonicità	C message factor	
		Valore	Valore in dB <sup>12</sup>
150	3	0,0333	-29,55
300	6	0,153109	-16,30
450	9	0,4102	-7,74
600	12	0,5623	-5,00
750	15	0,966	-0,30
900	18	0,966	-0,30
1050	21	1	0,00
1200	24	0,955	-0,40
1350	27	0,9226	-0,70
1500	30	0,871	-1,20
1650	33	0,8605	-1,30
1800	36	0,8601	-1,31
1950	39	0,8414	-1,50
2100	42	0,8407	-1,51
2250	45	0,841	-1,50
2400	48	0,8801	-1,11
2550	51	0,8801	-1,11
2700	54	0,7943	-2,00
2850	57	0,7235	-2,81
3000	60	0,708	-3,00
3150	63	0,55	-5,19
3300	66	0,556	-5,10
3450	69	0,441	-7,11
3600	72	0,335	-9,50
3750	75	0,335	-9,50
3900	78	0,2256	-12,93
4050	81	0,1368	-17,28
4200	84	0,1291	-17,78

Tabella 1 - Valori del C-message factor alle varie frequenze

---

<sup>12</sup> In questo contesto come valore in decibel di un numero a si intende  $20\text{Log}_{10}(a)$ .

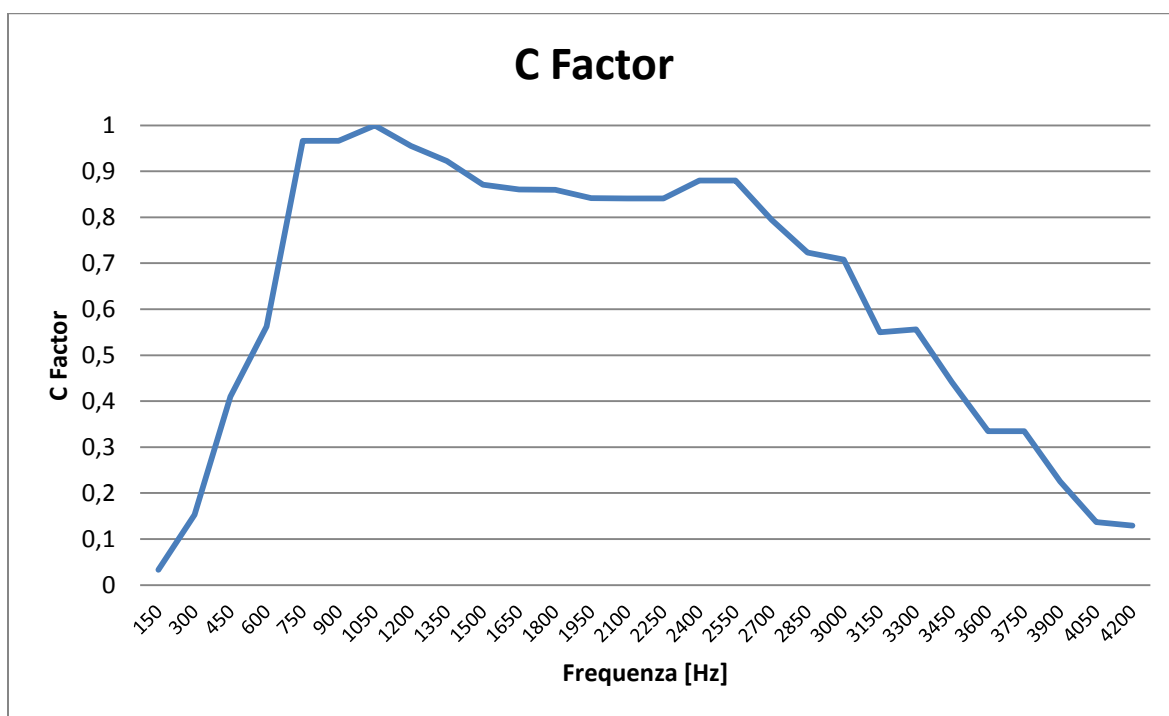


Grafico 2 - Andamento del C-message factor in funzione della frequenza

## 3.2 Valutazione delle interferenze

### 3.2.1 Valutazione delle interferenze: la tensione indotta

Considerando quanto detto, si ottiene quindi la formula seguente per il calcolo della tensione di rumore indotta in un circuito:

$$V_{m,l}^{13} = \sqrt{\sum_{n=1}^m \left[ \left( \sum_{j=1}^k I_{jn} Z_{mjn} \right) K_n B_n C_n \right]^2} \quad (3.2)$$

<sup>13</sup> La seguente formula indica una tensione indotta per unità di lunghezza: l'unità di misura generalmente adottata è il mV/km.

dove

$V_{m,l}$  è la tensione indotta pesata per unità di lunghezza;

$m$  è il massimo ordine di armonicità di interesse (generalmente pari a 50 oppure a 83);

$C_n$  è il valore del C message factor alla frequenza corrispondente all'armonica di ordine  $n$ ;

$K_n$  è il fattore di schermatura del sistema di comunicazione all'armonica  $n$ -esima;

$B_n$  è il fattore di bilanciamento del circuito all'armonica  $n$ -esima.

Test di laboratorio hanno stabilito che, al variare dell'entità della tensione indotta, si hanno i seguenti effetti sull'uomo:

Tensione indotta	Effetto sull'orecchio umano
Meno di 1 mV	Rumore di fondo indistinguibile
1 – 2 mV	Si può riconoscere un leggero rumore, ma solo se si sa che esso è presente
2 – 4 mV	Mormorio facilmente percepibile, con scarso effetto sulla qualità della comunicazione
4 – 7 mV	Mormorio facilmente percepibile, con effetti marcati sulla qualità della comunicazione

Tabella 2 - Effetti della tensione indotta sull'orecchio umano

In diversi Paesi si è soliti utilizzare limiti differenti per quanto riguarda i valori tollerabili di tensione indotta:

- 1 mV per la maggior parte degli Stati facenti parte del ITU-T (il settore della Unione Internazionale delle Telecomunicazioni che si occupa di regolare le telecomunicazioni telefoniche e telegrafiche);
- 2 mV per quanto riguarda Francia, Gran Bretagna, Irlanda e Giappone;
- 4.5 mV per quanto riguarda USA e Cina.

La limitazione di questi disturbi indotti è il criterio in base al quale si dimensiona il sistema di filtraggio lato continua di un impianto HVDC.

Come si vedrà in seguito, i limiti riportati nella tabella di cui sopra non sono necessariamente quelli che vengono usati come criterio per il dimensionamento dei filtri in continua degli impianti HVDC.

### 3.2.2 Valutazione delle interferenze: la corrente perturbata equivalente

L'equazione (3.2) introdotta al paragrafo precedente contiene una serie di termini dipendenti dalla frequenza, e comporta un calcolo laborioso.

Nel 1984 Patterson e Fletcher proposero un metodo più semplice per la valutazione delle interferenze provocate dagli impianti in corrente continua in linee telefoniche adiacenti: il calcolo della cosiddetta *corrente perturbata equivalente* ( $I_{eq}$ ). Essa è una corrente fittizia, avente un'unica componente armonica, che si immagina scorrere in un conduttore posto nel baricentro dei conduttori di potenza del collegamento in continua, e che induce nei circuiti di comunicazione circostanti la stessa tensione che si misura nel caso reale. Negli Stati Uniti e negli altri Paesi in cui la frequenza nominale della rete in alternata è pari a 60 Hz la corrente perturbata equivalente viene assunta con oscillazione a 1000 Hz; in Europa e in Cina invece la frequenza della  $I_{eq}$  è pari a 800 Hz.

Si può esprimere la tensione di rumore indotta  $V_m$  mediante la formula seguente [6]

$$V_m = Z_{mf_{eq}} K_{f_{eq}} B_{f_{eq}} I_{eq} L_p \quad (3.3)$$

dove

$f_{eq}$  è la frequenza di riferimento (800 Hz o 1000 Hz secondo quanto detto prima)

$Z_{mf_{eq}}$  è la mutua impedenza tra conduttore DC e circuito di comunicazione alla frequenza di riferimento

$K_{f_{eq}}$  è il fattore di schermatura del sistema di comunicazione alla frequenza di riferimento

$B_{f_{eq}}$  è il fattore di bilanciamento del circuito alla frequenza di riferimento

$I_{eq}$  è la corrente perturbata equivalente

$L_p$  è la lunghezza del tratto di linea esposto all'interferenza



### 3.2.2.1 Calcolo della corrente perturbata equivalente

La corrente perturbata equivalente  $I_{eq}$  si calcola partendo dalla corrente effettiva a ciascuna frequenza mediante la formula seguente

$$I_{eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_n C_n H_n)^2} \quad (3.4)$$

dove  $C_n$  ha il significato visto prima,  $I_n$  è la corrente all'armonica n-esima e  $H_n$  è un fattore di peso che tiene conto della natura generica dell'accoppiamento tra conduttore DC e sistema di comunicazione, normalizzato alla frequenza di riferimento<sup>14</sup>.

Spesso, la corrente perturbata equivalente si calcola mediante sovrapposizione di due termini, ossia delle  $I_{eq}$  prodotte dal raddrizzatore e dall'invertitore, utilizzando la formula:

$$I_{eq} = \sqrt{I_{eq,r}^2 + I_{eq,i}^2} \quad (3.5)$$

Ciascuno dei due termini che compaiono sotto radice si calcola in accordo all'espressione (3.4), considerando separatamente l'azione del raddrizzatore e dell'invertitore (sovrapposizione degli effetti).

#### Parametri da utilizzare:

Mutua impedenza: è funzione della distanza tra HVDC e sistema di comunicazione, lunghezza del tratto di parallelismo nonché della resistività del suolo. Per questo ultimo parametro (in generale variabile nell'intervallo 0.1 / 30000  $\Omega\text{m}$ ) si è soliti utilizzare per questi calcoli un valore di 200 oppure di 1000  $\Omega\text{m}$ .

Come riferimento per il calcolo della mutua impedenza tra linea di trasmissione in corrente continua e linea telefonica adiacente si utilizza generalmente la formula seguente, valida in caso i due conduttori siano paralleli:

---

<sup>14</sup> Per calcolare questo termine occorre conoscere l'impedenza di accoppiamento tra impianto HVDC e linea di telecomunicazione per ciascun tratto esposto e a ciascuna frequenza: non possedendo alcuna di queste informazioni si è scelto di porre pari a 1 il fattore  $H_n$  a tutte le frequenze.

$$Z_{mf_{eq}} = \frac{jw\mu_0}{2\pi} \ln \sqrt{\frac{\left(h_1 + h_2 + \frac{2}{\sqrt{\frac{jw\mu_0}{\rho}}}\right)^2}{(h_1 - h_2)^2 + D^2} + D^2} \quad (3.6)$$

dove

$h_1$  e  $h_2$  sono le altezze dal suolo rispettivamente del conduttore di potenza e telefonico;

$D$  è la distanza tra linea HVDC e linea di comunicazione;

$w$  è la pulsazione alla frequenza di riferimento;

$\rho$  è la resistività del terreno<sup>15</sup>;

$\mu_0$  è la permeabilità del vuoto.

Nel caso la linea telefonica non sia parallela al conduttore di potenza, bensì incidente, si utilizza il cosiddetto *metodo della scala*: si suddivide la linea in tanti segmenti, ciascun segmento è equivalente alla sua proiezione lungo la direzione del conduttore in continua, per il quale la mutua impedenza è calcolata con la formula di cui sopra

Fattore di schermatura  $K_{feq}$ : A seconda della tecnologia impiegata per la costruzione dei cavi del sistema di comunicazione varia tra 0.14 e 0.5.

Fattore di bilanciamento  $B_{feq}$ : Un tipico valore (utilizzato ad esempio per i più moderni impianti UHVDC in Cina) è 1/750.

I valori di  $K_{feq}$  e  $B_{feq}$  sono forniti dal gestore del sistema di comunicazione.

---

<sup>15</sup> La resistività del terreno è un parametro che influenza la  $I_{eq}$  in quanto l'accoppiamento tra circuito di potenza e linee di telecomunicazione è molto più influenzato dalle componenti omopolari delle correnti di polo (che si richiudono, appunto, nel terreno) piuttosto che da quelle di sequenza positiva e negativa. A parità di ampiezza, una corrente omopolare induce una tensione indicativamente di un ordine di grandezza superiore.

### 3.3 Definizione dei requisiti armonici lato DC

Nel corso degli anni si sono utilizzati tre metodi per indicare i requisiti di prestazione armonica richiesti al lato in corrente continua di un collegamento HVDC:

1. Limiti sulle correnti armoniche;
2. Metodo delle tensioni di rumore indotte (INV);
3. Metodo della corrente perturbata equivalente ( $I_{eq}$ ).

#### 3.3.1 Correnti armoniche

Esprimere i requisiti di prestazione secondo questa modalità significa indicare i limiti che devono avere le diverse componenti armoniche di corrente presenti nel collegamento, come si vede dalla tabella seguente (che riporta i limiti utilizzati per l'impianto Nelson River BP2). Questo metodo è stato utilizzato per il dimensionamento dei filtri nel progetto Nelson River BP2, oltre che per il progetto Itaipù in Brasile<sup>16</sup>.

Armonica	Massima corrente [A]
1	5.0
2	2.0
3	1.0
4	0.7
5	1.4
6	0.8
7	0.49
8	0.34
9	0.24
10	0.18
12	0.25
18	0.56
24	0.34
30	0.5
36	0.5

Tabella 3 - Limiti sulle correnti armoniche fissati per l'impianto Nelson River BP2

<sup>16</sup>Per quanto riguarda l'impianto brasiliano, i limiti sono stati indicati fino alla 48° armonica

### 3.3.2 Tensioni di rumore indotte

Questo metodo è stato utilizzato per i primi progetti di HVDC: le prestazioni dei filtri DC venivano indicate in termini di tensioni indotte pesate (mediante il C message factor) e standardizzate (cioè calcolate su una linea telefonica parallela lunga 1km, posta a 1km di distanza dal HVDC), considerando un valore di resistività del terreno pari a 100  $\Omega\text{m}$ .

Nella tabella seguente sono riportati alcuni valori limite di tensione di rumore indotte (INV) utilizzati per il dimensionamento dei filtri: si può notare come non esista un valore univoco; ciascun impianto ha peculiarità differenti, da cui derivano valori di INV anche molto variabili.

Progetto	Potenza [MW]	Tensione [kV]	Anno	INV [mV/km]
Gotland II	130	147	1983	200 (monopolare)
Konti-Skan II	300	285	1988	120 (monopolare)
Fenno-Skan	500	400	1989	40 (monopolare)

Tabella 4 - Esempi di valori limite di tensioni di rumore indotte utilizzati in casi reali

Bisogna sottolineare come negli anni non sia mai stato né indicato né proposto un criterio generale affidabile che descrivesse una metodologia precisa per definire quale fosse il valore di tensione di rumore indotta limite da utilizzare per il dimensionamento dei filtri in continua di un collegamento HVDC.

### 3.3.3 Corrente perturbata equivalente

Al fine della specificazione dei requisiti armonici lato DC si indica il valore massimo che può assumere il parametro  $I_{eq}$ . L'introduzione a partire dai primi anni '90 dei collegamenti in fibra ottica al posto dei tradizionali doppini in rame<sup>17</sup> ha permesso di innalzare di molto i valori ammissibili di corrente perturbata equivalente, con ovvi vantaggi economici (connessi ad un minor dimensionamento dei filtri). Questo metodo ha iniziato

---

<sup>17</sup> La fibra ottica ha un fortissimo, naturale effetto di mitigazione dei disturbi elettromagnetici indotti.

gradualmente ad affiancarsi a quello delle tensioni di rumore indotte (fino a sostituirlo quasi completamente ai giorni nostri) a partire dalla metà degli anni '80.

Al pari di quanto detto parlando delle tensioni di rumore indotte, non esiste ad oggi un criterio normato per stabilire quale sia il valore limite di  $I_{eq}$  da utilizzare: impianti diversi (con caratteristiche costruttive e impianti contigui differenti) utilizzano per definire le prestazioni armoniche lato DC valori assai differenti di questo parametro, come si può evincere dalla tabella seguente [10]. In generale, si assumono valori che – per la modalità di funzionamento bipolare – si attestano nell'intervallo  $0.5 \div 3$  A.

Impianto	Potenza [MW]	Tensione [kV]	Anno	I <sub>eq</sub> [mA]
Fenno-Skan <sup>18</sup>	500	400	1989	400 (monopolare)
New Zealand II	992	+270, -350	1992	2500 (monopolare)
Chandrapur-Padghe	1500	±500	1997	400 (bipolare) 800 (monopolare metallico)
Tian-Guang	1800	±500	2001	500 (bipolare) 1000 (monopolare)
Gui-Guang I	3000	±500	2004	
Three Gorges-Changzhou	3000	±500	2004	

Tabella 5 - Esempi di valori limite di corrente perturbata equivalente in casi reali

Come già detto, non esiste un criterio accettato a livello internazionale per determinare univocamente quale sia per un impianto HVDC il limite da assumere per la corrente perturbata equivalente. Alcuni autori hanno però negli ultimi anni suggerito delle possibili linee guida da seguire.

<sup>18</sup> Il collegamento Fenno-Skan, tra Svezia e Finlandia, utilizza il metodo delle tensioni di rumore indotte per la definizione dei requisiti armonici della stazione di conversione sita in territorio svedese, mentre quello della corrente perturbata equivalente per quanto riguarda l'estremità finlandese del collegamento.

- 1) Proposta di Wen J., Han M., Pan Y., Sun Z. (“Study on DC-Side Harmonics Interference Criteria for UHVDC Transmission Lines”, IEEE, 2009) [10]

In questo articolo si ritiene sia più semplice stabilire dei valori limite per la tensione di rumore indotta, per poi “tradurli” in termini di corrente perturbata equivalente. Si procede nella maniera seguente.

Invertendo la formula (3.3), e chiamando  $V_{invL}$  il valore limite per la tensione di rumore indotta, si ottiene la seguente espressione per la corrente perturbata equivalente limite

$$I_{eqL} = \frac{V_{invL}}{Z_{mf_{eq}} K_{f_{eq}} B_{f_{eq}}} \quad (3.7)$$

Non può sfuggire come la discrezionalità sia stata semplicemente spostata dalla definizione arbitraria di un limite sulla  $I_{eq}$  alla definizione di  $V_{invL}$ <sup>19</sup>: il fatto che fino alla data di pubblicazione del sopracitato articolo non fosse ancora stata trovata una metodologia più precisa dà un’idea di quanto complessa sia la trattazione del problema in esame.

- 2) Proposta di Zhang X., Li N., Wu X (“Equivalent Disturbing Current Limit for HVDC Project in New Period”, IEEE, 2010) [8]

In questo articolo è descritto un metodo innovativo per stabilire quale debba essere il limite di  $I_{eq}$  da utilizzare nella definizione dei requisiti armonici di un impianto HVDC. Si può parlare a questo proposito di metodo “probabilistico”, in quanto ci si prefigge di fissare un valore limite di corrente perturbata equivalente pari al valore per il quale la probabilità che si abbiano tensioni indotte nei circuiti di comunicazione adiacenti superiori ad un certo valore limite (da stabilirsi in fase progettuale in accordo con le compagnie telefoniche) non ecceda lo 0.5%.

Nell’articolo di cui sopra gli autori hanno scelto di porre pari a 2 mV il limite per quanto riguarda la tensione indotta  $V_m$ . Considerando distribuzioni casuali dei valori di  $L$  (lunghezza del tratto di linea telefonica interessata dal disturbo, quindi “esposta” al collegamento HVDC),  $D$  (distanza tra conduttore di potenza e linea telefonica) e  $\alpha$  (angolo

---

<sup>19</sup> Come già detto, anche il limite sulla tensione di rumore indotta non è mai stato normato.

di incidenza tra linea HVDC e linea telefonica) all'interno di determinati intervalli considerati quelli più comuni considerando lo stato attuale degli impianti cinesi<sup>20</sup>, si sono ottenute i seguenti valori per quanto riguarda  $I_{eq\_lim}$ , in funzione della resistività del terreno

Resistività del terreno [ $\Omega$ m]	200	600	1000
Corrente perturbata equivalente [mA]	3000	2000	1500

Tabella 6 - Valori di corrente perturbata equivalente limite in funzione della resistività del terreno calcolati nell'articolo "Equivalent Disturbing Current Limit for HVDC Project in New Period" [8]

Gli stessi autori evidenziano come questi limiti siano da considerarsi eccessivamente restrittivi, in quanto essi hanno utilizzato i valori più conservativi per quanto riguarda fattore di schermatura e densità di linee telefoniche nelle adiacenze dell'impianto HVDC. Inoltre, essi hanno considerato che il valore della  $I_{eq}$  (che prove sperimentali e misure su impianti in funzione hanno dimostrato registrarsi in corrispondenza delle stazioni di conversione) non degradi col crescere della distanza dalle estremità del collegamento ma si mantenga pari al valore massimo indipendentemente dalla posizione che si considera.

Ciò detto, si ritiene questo l'unico metodo che provi a stabilire delle linee-guida che portino alla definizione di un valore di corrente perturbata equivalente limite che non sia del tutto arbitrario. Nel paragrafo seguente sono presentati alcuni risultati che si ottengono applicando il metodo sopra descritto.

### 3.3.3.1 Calcolo della corrente perturbata equivalente limite

Il metodo "2" descritto al paragrafo precedente è facilmente implementabile mediante un software di calcolo. Essendovi una diretta corrispondenza tra la corrente perturbata equivalente e l'impedenza di accoppiamento linea HVDC / linea di telecomunicazione (secondo la già presentata formula  $V_{m\_lim} = Z_{m\_feq} K_{feq} B_{feq} I_{eq\_lim} L$ ) si può procedere nel modo seguente: combinando in tutte le maniere possibili i valori dei tre parametri D, L,  $\alpha$  (variabili indipendentemente l'uno dall'altro all'interno di determinati intervalli) si

<sup>20</sup> Gli intervalli utilizzati nell'articolo in questione sono i seguenti:  $0 \leq L \leq 8$  km;  $0 \leq D \leq 10$  km;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$

calcolano  $n_L * n_D * n_\alpha$ <sup>21</sup> valori del fattore di accoppiamento " $Z_{m_{feq}} * L$ "<sup>22</sup>. Ciascuno dei valori così calcolati corrisponde ad una precisa configurazione di impianto (la cui probabilità di ricalcare quella dell'impianto reale è pari a  $\frac{1}{n_L * n_D * n_\alpha}$ ) e ad un preciso valore di  $I_{eq\_lim}$ , appunto quello per cui la tensione indotta vale esattamente  $V_{m\_lim}$ : ordinando in ordine crescente i valori di  $I_{eq\_lim}$  ottenuti ed estraendo il percentile di ordine 0,5 (nel caso particolare, quindi, l'elemento in posizione 103985-esima) si ottiene il risultato voluto, cioè quel valore di corrente perturbata equivalente cui corrisponde una probabilità dello 0.5% di avere tensioni indotte sulla linea telefonica superiori a  $V_{m\_lim}$ . Qualora il valore reale di  $I_{eq}$  fosse esattamente pari al valore limite, la tensione di rumore indotta supererebbe il valore limite imposto per quelle  $(0.005 * n_L * n_D * n_\alpha)$  configurazioni di impianto corrispondenti a valori di  $I_{eq\_lim}$  inferiori rispetto a quello scelto, mentre sarebbe inferiore per le restanti  $0.995 * n_L * n_D * n_\alpha$  configurazioni: essendo ciascuna configurazione ugualmente "probabile" si è ottenuto proprio il risultato cercato.

I parametri che influenzano il valore di  $I_{eq\_lim}$  sono i seguenti:

- Gli intervalli in cui possono variare le grandezze  $L, D, \alpha$ ;
- Il valore della resistività del terreno<sup>23</sup>;
- Il valore dei coefficienti  $K_{feq}, B_{feq}$ ;
- L'altezza dal suolo delle linee di potenza e di comunicazione (che si è scelto qui di porre pari rispettivamente a 40 e a 8 metri).

Di seguito si riportano alcuni dei risultati ottenuti:

---

<sup>21</sup> Con  $n_L, n_D$  e  $n_\alpha$  si indicano rispettivamente il numero di valori con i quali si sono uniformemente discretizzati gli intervalli, rispettivamente, di lunghezza, distanza ed angolo di incidenza.

<sup>22</sup> Nei calcoli che seguiranno si è posto  $n_L = n_D = n_\alpha = 275$  : si valuteranno quindi 20796875 valori dell'impedenza di accoppiamento.

<sup>23</sup> La resistività del terreno è un parametro che – come ovvio – assumerà di norma valori molto variabili lungo lo sviluppo della linea in corrente continua (che si ricorda può svilupparsi per alcune centinaia di chilometri se non di più); non avendo in fase di studio preliminare una conoscenza esatta delle diverse tipologie di terreno che si incontreranno nel percorso si è soliti utilizzare dei valori costanti di resistività del suolo (200, 600, 1000  $\Omega m$ ) che si è visto essere accettabili in questo ambito [5,6]. In particolare, il già citato Standard IEEE consiglia di utilizzare – per motivi precauzionali – il maggiore dei valori di resistività sopra indicati.



+ Resistività del terreno 30  $\Omega\text{m}$  (terreno paludoso),  $K_{feq} = 0.32$ ,  $B_{feq} = 1/750^{24}$ :

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 1.3030 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 16 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.6515 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 5 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.8848 \text{ A}$ .

+ Resistività del terreno 200  $\Omega\text{m}$  (terra sabbiosa),  $K_{feq} = 0.32$ ,  $B_{feq} = 1/750$ :

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.7022 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 16 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.3511 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 5 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.5228 \text{ A}$ .

+ Resistività del terreno 1000  $\Omega\text{m}$  (ghiaia),  $K_{feq} = 0.32$ ,  $B_{feq} = 1/750$ :

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.4670 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 16 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.2335 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 5 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.3678 \text{ A}$ .

+ Resistività del terreno 5000  $\Omega\text{m}$  (terreno sassoso),  $K_{feq} = 0.32$ ,  $B_{feq} = 1/750$ :

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.3373 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 16 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 10 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.1687 \text{ A}$ .

Intervalli  $0 \leq L \leq 8 \text{ km}$ ;  $0 \leq D \leq 5 \text{ km}$ ;  $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ :  $I_{eq\_lim} = 0.2764 \text{ A}$ .

---

<sup>24</sup> I valori dei coefficienti adimensionali qui riportati sono quelli indicati come tipici nello standard IEEE [6].

Si nota come la dipendenza tra corrente perturbata equivalente e ampiezza della fascia all'interno della quale può variare la lunghezza del tratto di parallelismo sia lineare, mentre sia meno accentuata la dipendenza tra corrente perturbata equivalente e distanza tra linea HVDC e linea telefonica (il termine  $D$  compare nella formula della mutua impedenza all'interno dell'operatore logaritmo). Si evince quindi come il fattore che più influenza la  $I_{eq\_lim}$  sia la lunghezza dei parallelismi che si incontrano lungo lo svilupparsi della linea.

Al variare delle caratteristiche dei cavi con cui è realizzata la linea di telecomunicazione, ossia variando i valori dei coefficienti  $K_{feq}, B_{feq}$ <sup>25</sup> (e mantenendo per le altre grandezze gli intervalli suggeriti nell'articolo) con la resistività del terreno pari a  $1000 \Omega m$  si ottengono i risultati seguenti:

- $K_{feq} = 0.28, B_{feq} * \eta_{feq} = 0.0007 : I_{eq\_lim} = 1.0165 \text{ A}$  (E' il caso migliore, cioè la combinazione dei valori di  $K_{feq}, B_{feq}$  e  $\eta_{feq}$  cui corrisponde il valore più alto di  $I_{eq\_lim}$ ).
- $K_{feq} = 0.72, B_{feq} * \eta_{feq} = 0.00117 : I_{eq\_lim} = 0.2365 \text{ A}$  (Al contrario, questa è la combinazione cui corrisponde un valore di corrente perturbata equivalente minore).
- $K_{feq} = 0.5, B_{feq} * \eta_{feq} = 0.0009 : I_{eq\_lim} = 0.4428 \text{ A}$  (E' questa una combinazione dei valori dei coefficienti che si può ritenere "intermedia").

Si evidenzia quindi come conoscere il valore dei coefficienti  $K_{feq}$  e  $B_{feq}$  sia importante per quanto riguarda la valutazione del valore di corrente perturbata equivalente limite: le variazioni possono assumere valori anche significativi. Come già detto, i valori corretti di questi coefficienti vanno richiesti alla compagnia telefonica proprietaria delle linee site nella vicinanza dell'impianto.

---

<sup>25</sup> Questo è accettabile in quanto l'articolo [8], date le diversità fra linee di costruzione diversa, indicava come anche loro non avessero un valore univoco bensì variabile all'interno di determinati intervalli ( $0.28 \leq K_{feq} \leq 0.72; 0.0007 \leq B_{feq} \leq 0.00117$ ): i risultati presentati in questo articolo sono diversi da quelli calcolati proprio per questa diversità nei coefficienti scelti, essendo quelli suggeriti dallo standard IEEE [6] più svantaggiosi per i calcoli che si stanno effettuando.

### **3.4 Valutazione dei disturbi indotti in linee telefoniche adiacenti – il caso dei sistemi ferroviari**

Come già detto, non esiste in letteratura – oltre al metodo sopra sviluppato – nessuna linea guida di carattere generale per valutare la corrente perturbata equivalente limite per un impianto: troppe sono le variabili in gioco, la dipendenza dal tracciato della linea HVDC e delle adiacenti linee telefoniche è marcata (da essi dipendono i mutui accoppiamenti e la loro entità) quindi nessuno si sbilancia a fornire limiti di carattere generale.

A riprova di ciò si può osservare quanto avviene in ambito di valutazione dei disturbi indotti da linee ferroviarie elettrificate. La normativa CENELEC a riguardo [11] stabilisce che il disturbo causato da uno spettro di correnti presenti nel circuito di trazione venga rappresentato dalla cosiddetta corrente psfometrica, definita al pari della corrente perturbata equivalente utilizzata in ambito di HVDC come una somma delle diverse componenti armoniche di corrente, ciascuna pesata secondo il fattore psfometrico (i cui valori al variare delle frequenze sono molto simili al C-message weighting factor visto al paragrafo 3.1, come si può evincere dalla figura seguente). Anche in ambito ferroviario, però, non si stabilisce quale sia il massimo valore ammissibile per la corrente psfometrica, tanto è che nei diversi Paesi europei i limiti che ciascun ente ferroviario nazionale considera variano in maniera molto sensibile. Ad esempio, in Austria e Norvegia si assume un limite per la corrente psfometrica in regime permanente pari a 1.5 A, in Finlandia i valori crescono con la potenza dei locomotori e arrivano fino a 4.9 A mentre in Svizzera e nei Paesi Bassi si accettano correnti psfometriche fino al limite di 10 A. In altri Paesi, quali l'Italia e il Portogallo, non vi è alcun limite fissato. [12]

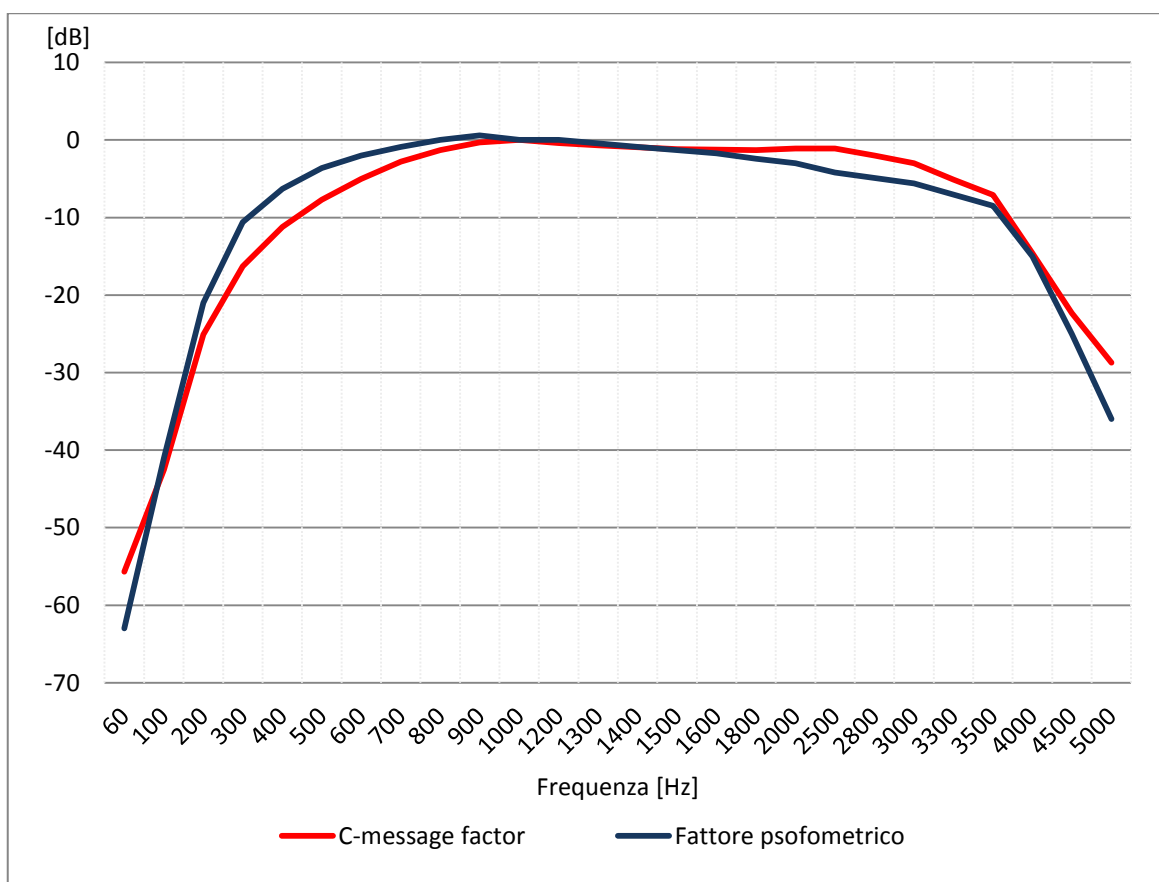


Grafico 3 - Confronto fra C-message factor e fattore psofometrico

---

## 4 MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA

### 4.1 Convertitore – Il modello a tre impulsi

Dovendo trattare - quando si parla di ottimizzazione dei filtri lato DC in un impianto HVDC - di problematiche legate alle correnti armoniche, la loro rappresentazione deve essere quanto più possibile accurata al fine di ottenere risultati che abbiano una coerenza ed un senso.

Il modello del convertitore che viene utilizzato abitualmente per rappresentare – lato DC – il convertitore negli studi sui disturbi indotte è il cosiddetto *modello a tre impulsi*, descritto per la prima volta nel 1989 [13]. Come già accennato nel paragrafo 2.2, la necessità di introdurre questo modello è sorta in quanto – effettuando misure sulle correnti circolanti nei conduttori di polo e nelle linee di elettrodo di impianti HVDC in esercizio<sup>26</sup> – ci si accorse del fatto che il loro contenuto armonico era diverso rispetto a quello previsto dalla teoria classica; in particolare, non erano presenti le sole armoniche (di corrente) caratteristiche, bensì tutte le componenti di ordine  $3n$ . Il fatto che la loro ampiezza fosse tutt'altro che trascurabile e soprattutto il fatto che si fossero trovate anche armoniche multiple di tre dispari (che non potevano essere spiegate semplicemente introducendo sbilanciamenti ed imperfezioni all'interno del modello classico) portò a credere che occorresse ripensare ad una più corretta modellizzazione del comportamento dei ponti a tiristori e quindi delle stazioni di conversione.

Causa principale dell'esistenza di queste componenti armoniche è stata individuata [14,15] nella presenza delle capacità parassite degli avvolgimenti del trasformatore e del reattore di spianamento<sup>27</sup>, che costituiscono vie di richiusura per le correnti armoniche che non

---

<sup>26</sup> Il primo impianto sul quale è stata evidenziata, a seguito di rilievi sperimentali, questa problematica è il IPP & New England-Hydro Quebec Phase I.

<sup>27</sup> Generalmente, questa capacità si aggira attorno a qualche nF per avvolgimento [13].

venivano considerate nel modello classico<sup>28</sup>: proprio per tener conto di questi elementi capacitivi si è introdotto il modello a tre impulsi, che permette di rappresentare correttamente non solo come detto tutte le vie di richiusura a terra presenti nel sistema (giustificando in tal modo la presenza delle armoniche di ordine  $3n$ ) ma anche di includere l'effetto di qualunque altra dissimmetria si voglia rappresentare. Grazie a questo modello si riesce a prevedere con esattezza l'andamento delle armoniche lato corrente continua, e ancora oggi gli standard suggeriscono di modellizzare in questo modo i convertitori.

Nella teoria classica, il convertitore a sei impulsi veniva rappresentato come un elemento bi-porta costituito da un generatore ideale di tensione in serie con la propria impedenza interna. Questa impedenza era generalmente approssimata con un'induttanza, di valore pari al valor medio<sup>29</sup> dell'induttanza del trasformatore vista dai terminali del convertitore. Per rappresentare un convertitore a reazione dodecafase bastava collegare in serie due di questi elementi bi-porta aventi sfasamento reciproco fra le tensioni di  $\pm 30^\circ$ , ottenendo la cancellazione delle armoniche di ordine  $6*k$ , con  $k$  dispari.

Con il modello a tre impulsi, invece, si spezza il convertitore a reazione esafase in due “sottoconvertitori” a tre impulsi, utilizzando il modello a tre porte rappresentato nella figura 11, dove ciascuna induttanza  $L$  rappresenta la metà del valor medio dell'induttanza del trasformatore vista dai terminali del convertitore e la capacità concentrata  $C$  uguaglia l'ammontare totale delle capacità di dispersione verso terra<sup>30</sup>.

---

<sup>28</sup> L'esistenza di vie di richiusura delle correnti tra convertitore e terreno fu scoperto notando come – nel funzionamento monopolare – le correnti nella linea di polo e in quella di elettrodo non fossero uguali.

<sup>29</sup> Con “valor medio” si intende – qui e nel seguito del paragrafo – la media tra il valore dell'induttanza di una fase del trasformatore e quello di due fasi in parallelo, pesata per il tempo in cui – all'interno di un periodo – si ha rispettivamente la conduzione attraverso una oppure due valvole. Nel caso ideale di commutazione istantanea il valore di  $L$  è quindi pari a quello di una fase del trasformatore. Detto  $u$  l'angolo di sovrapposizione espresso in gradi, la formula per il calcolo del valore di  $L$  è la seguente, dove con  $L_t$  si identifica il valore dell'induttanza di una fase del trasformatore:  $L = \frac{1}{2} \frac{0.5L_t * u + L_t * (60 - u)}{60}$ .

<sup>30</sup> Nel già citato articolo [13] si indica come queste capacità abbiano un valore compreso tra i 10 e i 20 nF: nello svolgere questo lavoro assumerò che esse valgano 12 nF, riprendendo l'esempio contenuto nella stessa pubblicazione e facente riferimento ad un impianto bipolare con tensione di  $\pm 500$  kV.

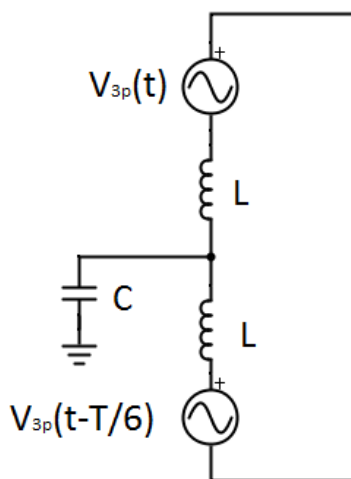


Figura 11 - Ponte a reazione esafase rappresentato mediante il modello a tre impulsi

Quello riportato sopra è un ponte a reazione esafase rappresentato utilizzando il modello a tre impulsi: la rappresentazione del convertitore a reazione dodecafase (doppio esafase) è ottenuta ponendo in serie due circuiti del tipo di figura 11, con gli opportuni sfasamenti fra le tensioni ( $\pm 30^\circ$ ). Il convertitore a reazione dodecafase completo è rappresentato nella figura seguente.

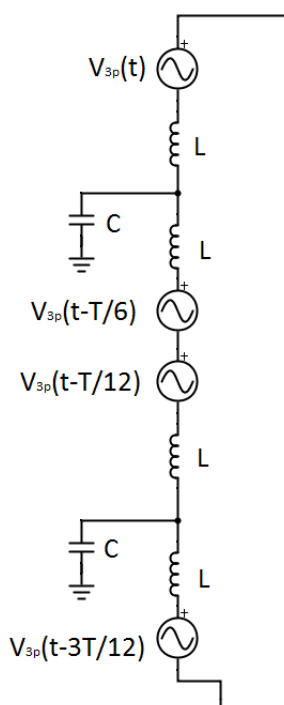


Figura 12 – Ponte a reazione dodecafase rappresentato mediante il modello a tre impulsi

Utilizzando questa rappresentazione si possono facilmente determinare gli sfasamenti relativi fra le tensioni di ciascun generatore: i valori di questi sfasamenti sono riportati nella figura seguente, in cui si è posta arbitrariamente pari a zero la fase del generatore superiore.

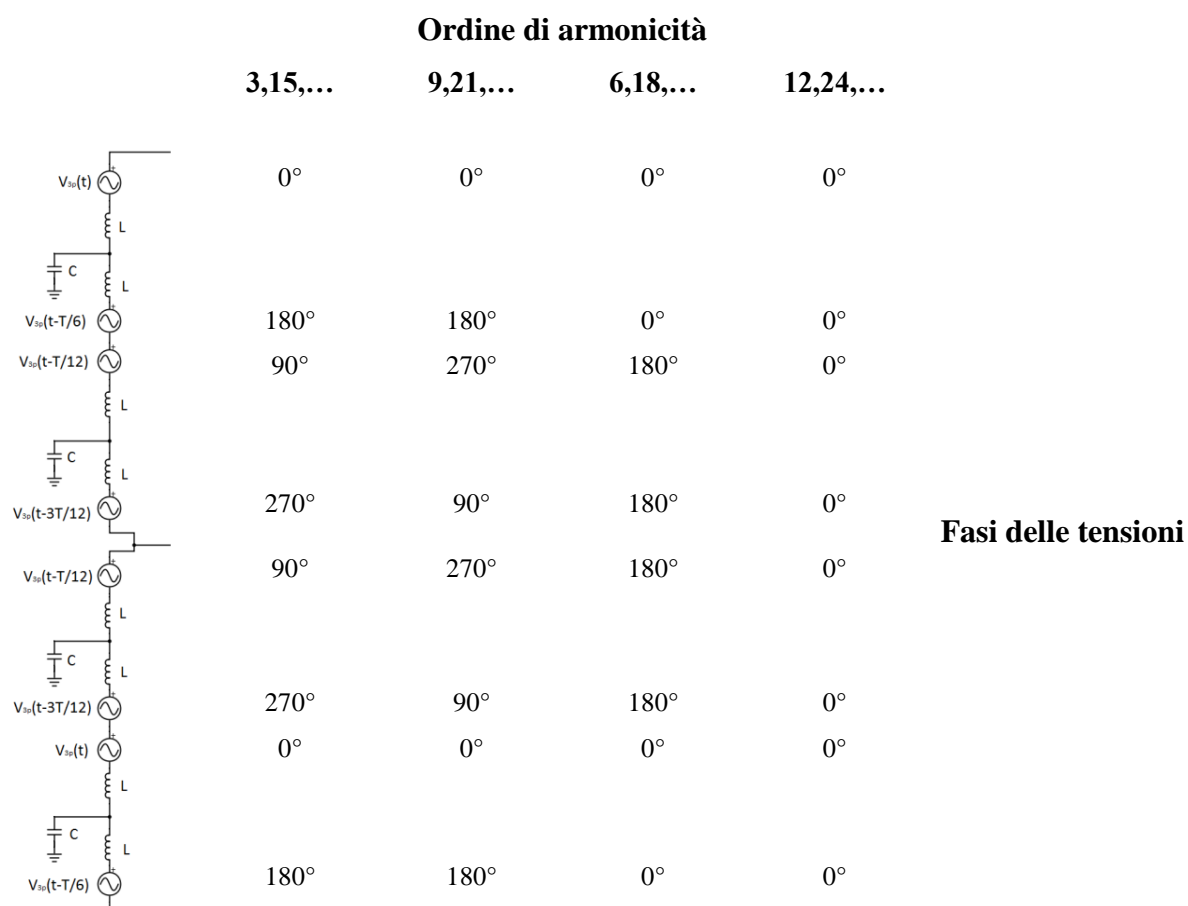


Figura 13 - Sfasamenti relativi fra le tensioni del modello a tre impulsi

Da un'osservazione dei valori assunti dalle fasi dei generatori si osserva come, ipotizzando di non considerare le capacità, le tensioni risultanti ai capi dei ponti conterrebbero solo le armoniche caratteristiche, in quanto tutte le altre si annullerebbero: si ritorna in questo modo al modello sviluppato nella teoria classica.



Le relazioni fra le fasi dei diversi generatori costituenti il modello del ponte hanno una diretta correlazione con il comportamento e la circolazione delle correnti armoniche:

- Armoniche pari non multiple di 12: la relazione di fase tra le tensioni è tale per cui la corrente circolante nelle capacità si cancella: la corrente cioè circola nella maglia di terra della stazione ma non vi è una corrente residua esterna nel collegamento di neutro. Una piccola percentuale della corrente complessiva fluisce nei conduttori di potenza ma il suo impatto per quanto riguarda le interferenze è trascurabile (non avendo comportamento di tipo residuo).

La figura seguente rappresenta le maglie in cui circolano le correnti a queste armoniche.

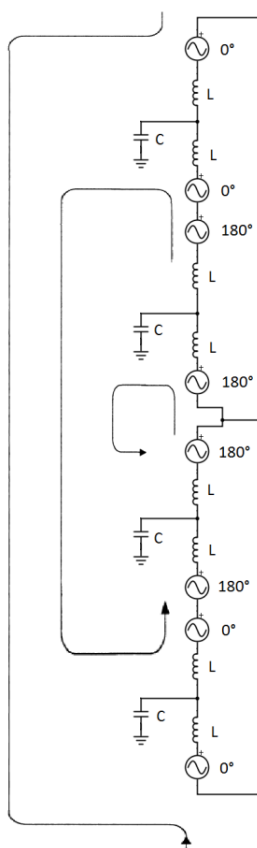


Figura 14 - Percorsi delle correnti alle armoniche 6, 18, 30 ...

- Armoniche pari multiple di 12: esse sono le armoniche caratteristiche del ponte: dalla figura 13 si nota che a queste frequenze tutte le tensioni sono in fase, quindi non si può applicare un'analisi diretta della circolazione di corrente. Verifiche condotte sugli impianti in esercizio hanno indicato come nel funzionamento

bipolare bilanciato le correnti di dispersione che circolano nelle capacità si richiudano nell'impianto di terra della stazione fra i due poli, senza interessare il circuito esterno. Le correnti che fluiscono nei conduttori di polo sono invece bilanciate, quindi non provocano interferenze. [13]

- Armoniche dispari: i generatori di tensione del modello a tre impulsi sono in opposizione di fase, quindi vi è la circolazione di una corrente residua a terra. Questa corrente deve richiudersi, e lo fa attraverso il neutro oppure attraverso i poli del collegamento (in particolare attraverso le capacità verso terra della linea in corrente continua).

La figura seguente rappresenta le vie ove le correnti di ordine dispari circolano: le fasi dei generatori sono quelle che si hanno per armoniche di ordine  $3+12*n$  (con  $n$  intero); il comportamento delle correnti è però lo stesso anche per le altre componenti dispari.

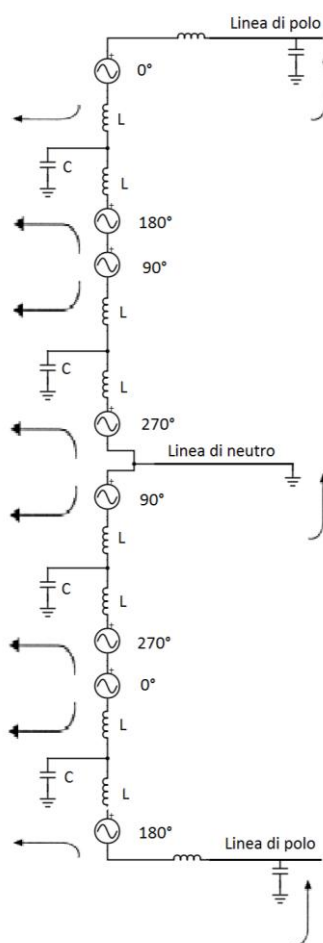


Figura 15 - Percorsi delle correnti dispari

---

Nel funzionamento bipolare bilanciato la presenza di queste correnti di dispersione, che fluiscono attraverso l'impedenza interna del convertitore, genera delle tensioni residue per ciascun polo, anche per quelle pulsazioni (le armoniche non caratteristiche) per le quali i generatori del modello a tre impulsi hanno fasi tali per cui le tensioni si cancellerebbero fra di loro.

Nel funzionamento bipolare sbilanciato i parametri elettrici (ampiezza della tensione e della corrente DC, angolo di fase delle valvole) differiscono leggermente tra i due poli, a causa di errori e tolleranze. Questo comporta una differenza nell'ampiezza e nella fase delle tensioni armoniche prodotte dai due poli, quindi la descrizione fatta al paragrafo precedente perde di validità.

In particolare, si possono fare le considerazioni seguenti:

- Si perde la cancellazione interna al convertitore delle armoniche pari non caratteristiche, quindi anche queste provocano la circolazione di una corrente residua all'esterno della stazione.
- Anche le correnti alle armoniche caratteristiche hanno un (parziale) comportamento da correnti residue.
- Per quanto riguarda le armoniche dispari si ha uno sfasamento delle correnti di dispersione e di conseguenza una variazione del valore totale di corrente.

Abbiamo visto che un impianto bipolare può in situazioni di emergenza essere esercito in maniera monopolare, quindi anche questa condizione di funzionamento deve essere analizzata. Nel funzionamento monopolare il cambiamento più significativo consiste nell'avere un comportamento da correnti residue anche da parte delle armoniche caratteristiche, quindi un loro significativo contributo alle interferenze (al contrario, come visto, di quanto avviene nel caso di funzionamento bipolare bilanciato). Si osservi, grazie all'ausilio della figura seguente (che si riferisce al caso di funzionamento monopolare con ritorno metallico, analoghi ragionamenti possono essere fatti nella situazione in cui la richiusura avvenga attraverso il terreno), come sia la messa a terra del neutro a "creare" queste correnti residue. Si nota come la corrente "1" che percorre la capacità di dispersione superiore si richiuda attraverso gli accoppiamenti capacitivi verso terra della linea –

percorrendo quindi il conduttore di polo – mentre la corrente “2” vede una richiusura ad impedenza nulla nella messa a terra del neutro e non percorra quindi il conduttore di ritorno. L’effetto che si ha è quello di avere correnti residue alle armoniche caratteristiche, che appunto per questo nel funzionamento monopolare assumono un ruolo centrale per quanto riguarda i disturbi indotti.

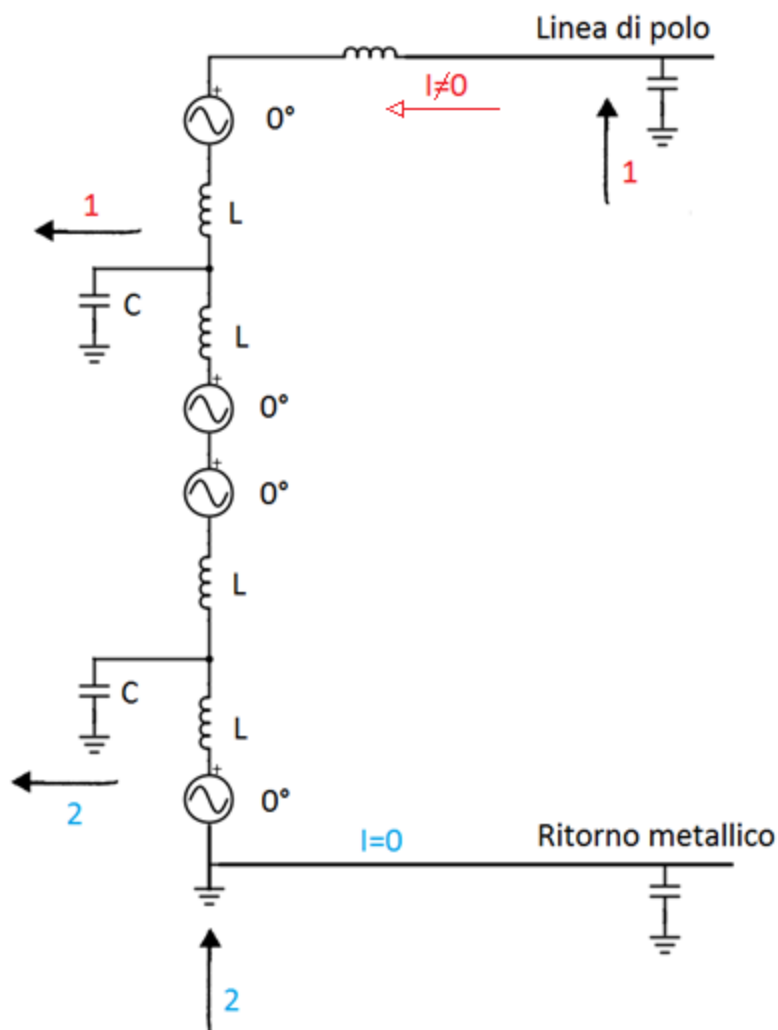


Figura 16 - Circolazione delle correnti alle armoniche caratteristiche - funzionamento monopolare

Il fatto che nel funzionamento monopolare le correnti alle armoniche caratteristiche (che sono quelle di ampiezza più consistente) entrino in gioco per quanto riguarda la generazione di disturbi è la causa principale della definizione di valori di  $I_{eq}$  limite

superiori nel funzionamento monopolare rispetto a quello bipolare (si riveda a tal proposito la Tabella 5).

#### 4.1.1 Calcolo delle tensioni armoniche

Per quanto riguarda l'utilizzo del modello a tre impulsi, le tensioni di ordine  $3n$  vengono calcolate mediante lo sviluppo in serie di Fourier riportato di seguito, dove  $a_{3k}$  e  $b_{3k}$  sono le componenti ortogonali della serie di Fourier, con  $\delta$  si indica la somma degli angoli  $\alpha$  di controllo di fase e  $u$  di commutazione [13].

$$V_{3p}(t) = \frac{1}{4} V_{d0} \left[ (\cos \alpha + \cos \delta) + \sum_{k=1}^{\infty} [-1^k (a_{3k} \cos(3k\omega t) + b_{3k} \sin(3k\omega t))] \right] \quad (4.1)$$

$$a_{3k} = \frac{\cos[\alpha(1+3k)] + \cos[\delta(1+3k)]}{1+3k} + \frac{\cos[\alpha(1-3k)] + \cos[\delta(1-3k)]}{1-3k} \quad (4.2)$$

$$b_{3k} = \frac{\sin[\alpha(1+3k)] + \sin[\delta(1+3k)]}{1+3k} - \frac{\sin[\alpha(1-3k)] + \sin[\delta(1-3k)]}{1-3k} \quad (4.3)$$

L'approccio dello sviluppo in serie di Fourier non può essere utilizzato qualora si vogliano tenere in considerazione le possibili dissimmetrie<sup>31</sup>. Queste dissimmetrie possono influenzare le armoniche di ordine  $3n$ , nonché generare armoniche non caratteristiche di altro ordine. Poiché calcolare esplicitamente i coefficienti di Fourier in questi casi non è affatto agevole, si preferisce procedere con la cosiddetta *analisi lineare a tratti*. Essa consiste in un'analisi istantanea nel dominio del tempo di tensione/corrente in ciascun intervallo di conduzione delle valvole del ponte, seguita dal calcolo approssimato mediante integrazione numerica dell'espressione della serie di Fourier. Per questa analisi si utilizza un circuito che includa la struttura completa del ponte, le induttanze di ciascuna fase del trasformatore, le tensioni di ciascuna fase e il reattore di spianamento. La rete DC è rappresentata da una forza controlettromotrice.

Nei calcoli che seguiranno, comunque, non si prenderanno in considerazione dissimmetrie di alcun tipo.

---

<sup>31</sup> Le dissimmetrie possono verificarsi in ciascuna delle seguenti: reattanze di fase, istanti di accensione delle valvole, rapporti di trasformazione, tensione di fase lato AC.

## 4.2 Dimensionamento dell'impianto di riferimento

L'impianto di riferimento sul quale verranno svolti i calcoli di ottimizzazione dei filtri DC è un impianto predisposto per il funzionamento bipolare, scelto con una potenza nominale pari a 3000 MW e una tensione di  $\pm 500$  kV; la lunghezza del collegamento in continua è pari a 1000 km ed esso è costituito da una linea aerea.

### 4.2.1 Scelta dei tralicci e dei conduttori.

Per quanto riguarda i tralicci si è presa come riferimento la geometria del palo presente come esempio per impianti HVDC bipolari all'interno del software MATLAB Simulink, le cui caratteristiche sono riportate nella figura seguente. Le posizioni indicate come A e A' sono quelle in cui sono collocati i conduttori di polo, mentre le lettere b e b' identificano la posizione delle funi di guardia.

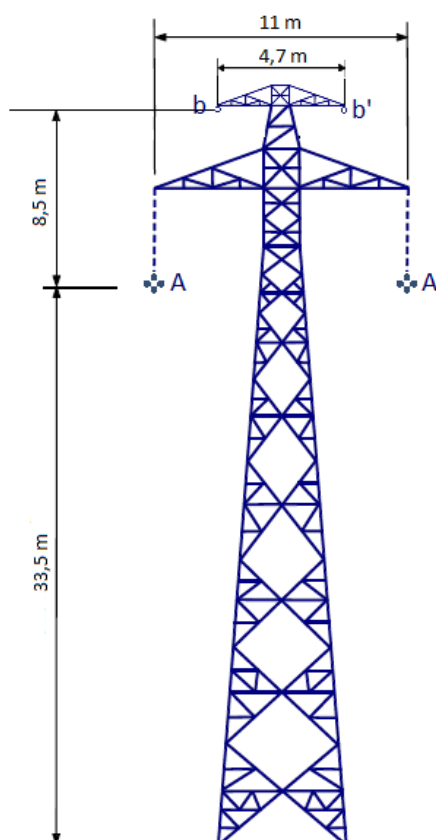


Figura 17 - Traliccio presente in Simulink come esempio

Essendo questo traliccio dimensionato per una tensione di  $\pm 450$  kV, si sono scalate linearmente le sue dimensioni<sup>32</sup> in modo da ottenere una distanza di isolamento adeguata alla tensione di interesse di 500 kV. Effettuata questa operazione, le dimensioni del traliccio utilizzato nei calcoli che seguiranno è riportato nella figura seguente (dove le lettere assumono il significato della figura precedente).

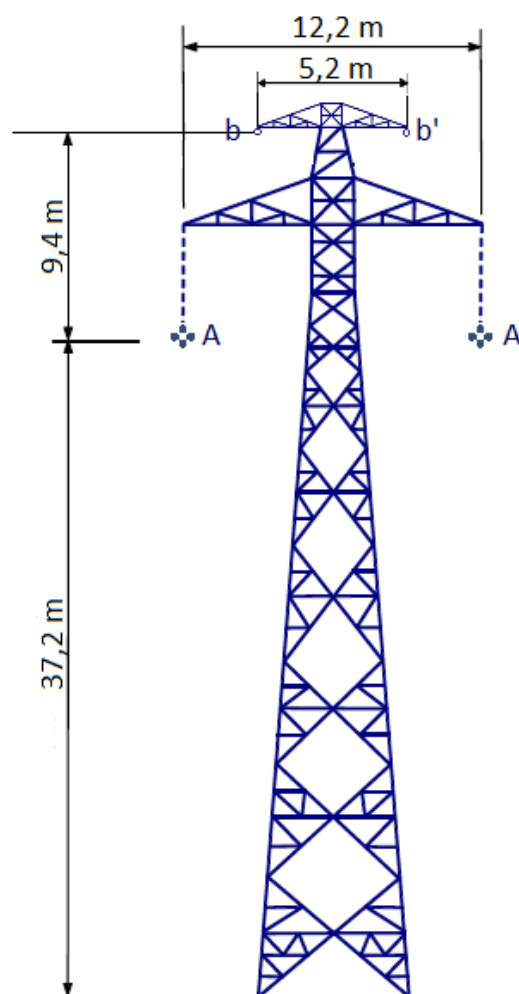


Figura 18 - Dimensioni del nuovo traliccio dimensionato per una tensione di  $\pm 500$  kV.

Definire con precisione la geometria dei tralicci è fondamentale in quanto anche da essa dipendono le matrici di auto e mutue resistenza, induttanza e capacità dei conduttori costituenti la linea.

<sup>32</sup> Con un fattore di scala di 10:9.

Associato al traliccio sopra descritto il software Simulink indica anche le caratteristiche elettriche e geometriche dei conduttori di polo e delle funi di guardia.

In particolare, per quanto riguarda i conduttori si riportano i dati seguenti:

Tipologia	Diametro esterno subconduttori [cm]	Rapporto T/D <sup>33</sup>	Resistenza DC a 20 °C [ $\Omega$ /km]	Permeabilità relativa conduttori	Numero subconduttori per fascio	Diametro fascio [cm]
ACSR <sup>34</sup>	3.56	0.375	0.045	1	4	64.7

Tabella 7 - Caratteristiche del conduttore riportato come esempio nel software Simulink

Le caratteristiche del conduttore indicato sono simili a quelle del conduttore ACSR “Dipper”, le cui caratteristiche elettriche sono riportate nella tabella seguente.<sup>35</sup>

Tipologia	Diametro esterno subconduttori [cm]	Rapporto T/D	Resistenza DC a 20 °C [ $\Omega$ /km]
ACSR “Dipper”	3.52	0.375	0.042

Tabella 8 - Caratteristiche del conduttore ACSR "Dipper"

Il documento citato alla nota 35 riporta anche la portata di questo conduttore, che è pari a 1229 A (la portata è valutata con i seguenti dati: temperatura del conduttore pari a 75 °C, temperatura ambiente pari a 25 °C, velocità del vento 0.61 m/s, irraggiamento solare 1033 W/m<sup>2</sup>, coefficienti di emissività e assorbimento del conduttore 0.5). Data la somiglianza tra i dati dei due conduttori, si considera che la portata del conduttore di cui alla tabella 7 sia pari a quella del conduttore Dipper, per cui la portata complessiva del fascio di conduttori è pari a 4916 A, valore adeguato a trasportare la potenza di 3000 MW alla tensione nominale con adeguati margini di sicurezza. Considerando questo fatto, si assume accettabile

<sup>33</sup> Il rapporto T/D equivale al rapporto fra lo spessore del materiale conduttore (T) e il diametro esterno (D): il calcolo dell'induttanza interna del conduttore si basa su questo parametro.

<sup>34</sup> “ACSR” è un acronimo inglese che sta per “Aluminum conductor steel reinforced cable” – sono gli usuali conduttori con anima in acciaio e guscio esterno in alluminio utilizzati per la trasmissione in altissima tensione.

<sup>35</sup> Fonte: [www.sural.com/products/catalog/bare/Bare\\_ACSR.pdf](http://www.sural.com/products/catalog/bare/Bare_ACSR.pdf)



utilizzare nell'impianto oggetto di studio i conduttori presenti nel software Simulink e indicati alla tabella 7.

La bontà della scelta di questa tipologia di conduttore è confermata dall'articolo [16] in cui viene indicato come nell'impianto sito in Cina che collega la diga delle tre Gole a Changzhou – avente la stessa potenza e tensione dell'impianto che qui si sta considerando – si siano utilizzati fasci da quattro subconduttori aventi ciascuno diametro di 3.02 cm.

Per quanto riguarda invece le funi di guardia i dati salienti sono i seguenti:

Diametro esterno [cm]	Rapporto T/D	Resistenza DC a 20 °C [ $\Omega$ /km]	Permeabilità relativa conduttore	Numero subconduttori per fascio
1.27	0.5	2.213	1	1

Tabella 9 - Caratteristiche delle funi di guardia

#### 4.2.2 Rappresentazione della linea

Essendo la linea in continua dell'impianto analizzato lunga 1000 km, è necessario rappresentarne il modello a parametri distribuiti. Il software Simulink è in grado – date le caratteristiche geometriche ed elettriche dei conduttori e le dimensioni dei tralicci – di valutare le matrici di auto e mutua resistenza, induttanza e capacità della linea e quindi di implementarne il modello a parametri distribuiti, basato sulle equazioni di propagazione delle onde di Bergeron. Per utilizzare questa funzionalità del software si sono però dovuti prendere alcuni accorgimenti. Infatti, il programma è strutturato in modo da considerare le funi di guardia come conduttori vincolati al potenziale di terra e aventi i terminali inaccessibili, quindi non vi è la possibilità di misurare le correnti che in esse fluiscono. Le linee sono quindi rappresentate come elementi circuitali aventi due morsetti per ciascun conduttore (o fascio di subconduttori come nel nostro caso) di potenza: l'influenza delle funi di guardia è calcolata, ma i loro terminali non sono in evidenza. Essendo però anche la corrente circolante nelle funi di guardia causa di interferenze, trascurarla non è parsa una via percorribile. Per avere accessibili i morsetti delle funi di guardia e quindi potere effettuare le misure di corrente necessarie l'unica possibilità è quella di eliminare dal modello implementato nel software le funi di guardia, inserendo al loro posto dei nuovi

---

conduttori - aventi caratteristiche elettriche e meccaniche identiche a quelle delle funi di guardia (riportate nella Tabella 9) - nelle posizioni ove devono essere installate le funi di guardia (b-b' della Figura 18), e vincolarli ai due capi della linea al potenziale di terra: in tal modo questi conduttori svolgono lo stesso ruolo delle funi di guardia che sono state precedentemente cancellate dal software. Avendoli rappresentati come conduttori di fase, il programma li rende accessibili e quindi permette di valutarne le correnti; il rovescio della medaglia è però la perdita dell'equipotenzialità: non essendo più vincolati al potenziale di terra lungo tutta la lunghezza del collegamento ma solo agli estremi, le tensioni dei conduttori-funi di guardia rispetto al riferimento sono libere di variare. Avendo collegamenti a terra solo in corrispondenza delle due stazioni (quindi a distanza di 1000 km l'uno dall'altro) e non - come avviene nella realtà - ogni centinaio di metri circa<sup>36</sup>, considerare l'intera linea come un unico elemento a otto morsetti avente le funi di guardia rappresentate da conduttori fittizi vincolati al potenziale di terra solamente alle estremità non è accettabile in quanto troppo poco aderente alla realtà.

Un ulteriore elemento di complicazione è sorto in quanto si è scelto di valutare il parametro corrente perturbata equivalente non solo in corrispondenza delle stazioni di conversione, ma anche in otto sezioni intermedie del collegamento in continua (in modo da avere complessivamente dieci valori di  $I_{eq}$  in corrispondenza di dieci diverse posizioni): occorre quindi avere la possibilità di misurare le correnti fluenti nei conduttori e nelle funi di guardia anche in ciascuna di queste otto sezioni, segmentando la linea e rappresentandola come serie di nove settori, ciascuno di lunghezza pari ad un nono della complessiva.

Tenendo in considerazione questi due fattori, quindi, si è scelto di rappresentare la linea elettrica come serie di nove elementi, ciascuno costituito a sua volta da:

- un tratto - pari a 5 km - in cui si rappresenta la linea come un elemento a otto terminali, quindi con funi di guardia accessibili (in quanto rappresentate come conduttori di polo fittizi) e vincolate a terra solo agli estremi;

---

<sup>36</sup> Distanza indicativa fra due tralicci consecutivi: nelle linee di trasmissione la messa a terra della fune di guardia avviene appunto in corrispondenza di ogni traliccio.

- un tratto di linea – pari a 100 km – in cui si utilizza il modello implementato in Simulink, con funi di guardia inaccessibili e automaticamente vincolate al potenziale di riferimento;
- un tratto di linea – pari a 5 km – con funi di guardia accessibili e vincolate a terra agli estremi, al termine del quale si effettuano le misurazioni delle quattro correnti (le due dei conduttori di polo e le due delle funi di guardia).

La figura seguente mostra l'implementazione in Simulink di uno dei nove elementi sopra descritti: i morsetti “out” di un elemento vengono collegati ai corrispondenti morsetti “in” dell'elemento successivo; si notano anche evidenziati in azzurro gli amperometri utilizzati per la misura delle correnti di interesse.

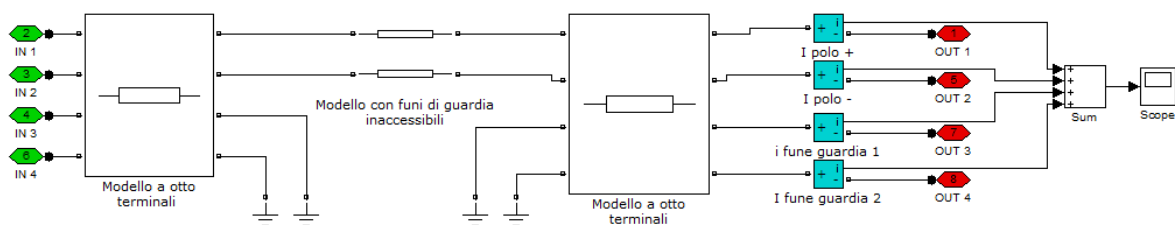


Figura 19 - Schema di un elemento costitutivo della linea in Simulink

La scelta di non segmentare semplicemente la linea in nove tronconi aventi i conduttori-funi di guardia accessibili è dovuta ancora una volta al fatto che avere vincolato il potenziale solo agli estremi di ciascuno di questi segmenti (quindi ogni 110 km circa) sarebbe stata una condizione troppo differente da quella reale per essere accettabile.

In questo modo si è raggiunto il duplice obiettivo di riuscire a misurare le correnti nelle funi di guardia (quindi di avere una valutazione corretta del parametro corrente perturbata equivalente) mantenendo una rappresentazione aderente alla realtà della messa a terra delle funi di guardia stesse.

La scelta della lunghezza dei tratti con fune di guardia accessibile è stato un altro elemento valutato con cura: per avere risultati che fossero il più corretti possibili si sarebbe dovuto ridurre (al limite, andando verso lo zero) la lunghezza dei tratti “a otto terminali” (ossia la lunghezza dei tratti nei quali la fune di guardia non ha potenziale uniformemente nullo). Così facendo, però, i tempi di calcolo sarebbero aumentati proporzionalmente al diminuire

della lunghezza di questi tratti (dovendosi avere necessariamente un passo di calcolo minore delle costanti di propagazione della linee).

A titolo esemplificativo si riportano nella tabella seguente i tempi necessari per simulare 5 secondi di funzionamento dell'impianto al variare della lunghezza degli spezzoni di linea e quindi del passo di calcolo usato.

Lunghezza tratto a 8 terminali [km]	Costante di propagazione [ $\mu$ s]	Passo di calcolo utilizzato [ $\mu$ s]	Durata simulazione [s]
0.5	1,6873	1,6	2000
1	3,3745	3,2	1000
5	16,873	16	200

Tabella 10 - Tempi occorrenti per la simulazione di 5 secondi di funzionamento al variare della lunghezza dei tratti con funi di guardia accessibili

La scelta è ricaduta su tratti di lunghezza pari a 5 km l'uno in quanto si è verificato come l'andamento delle correnti nelle funi di guardia fosse sostanzialmente identico nei tre casi, quindi scegliere lunghezze inferiori avrebbe prodotto solo un allungamento dei tempi di calcolo senza variazioni nella precisione della simulazione. Di seguito si riportano gli andamenti nel tempo della somma delle correnti nelle funi di guardia, valutate a regime e in corrispondenza della stazione funzionante da raddrizzatore, con potenza trasmessa dall'impianto pari alla nominale. Nella prima figura è riportato un periodo di 20 ms, nella seconda l'intervallo di tempo è pari invece a 6.67 ms (pari ad un'oscillazione completa della minima armonica presente – la terza a 150 Hz).

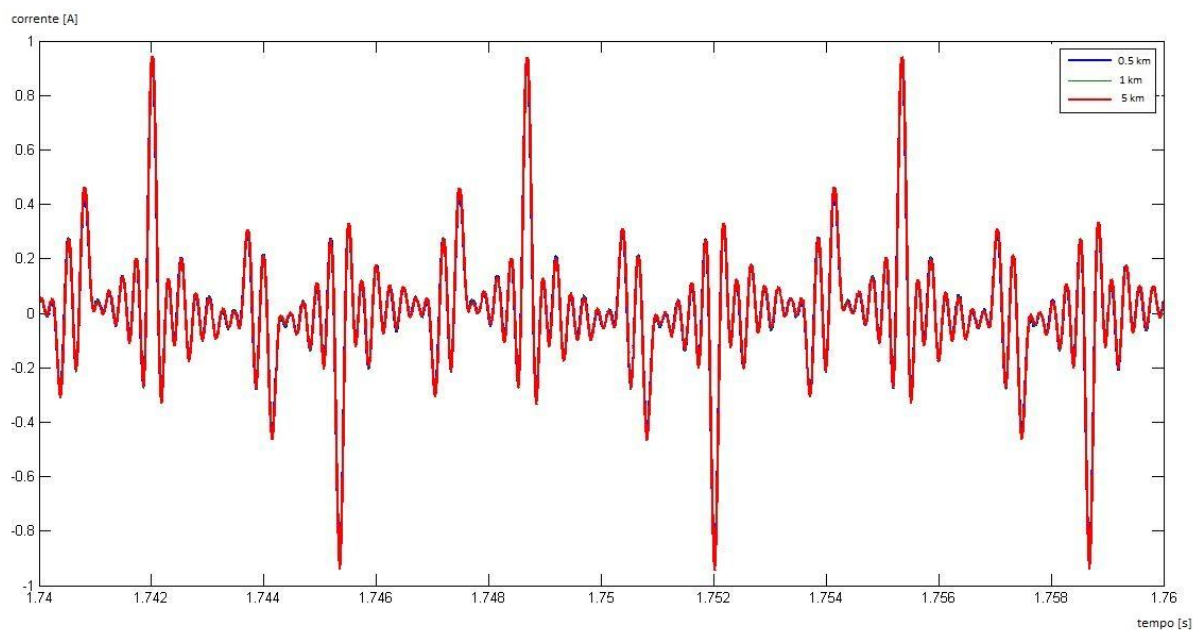


Grafico 4 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia al variare della lunghezza dei tratti con funi accessibili,  $T=20$  ms

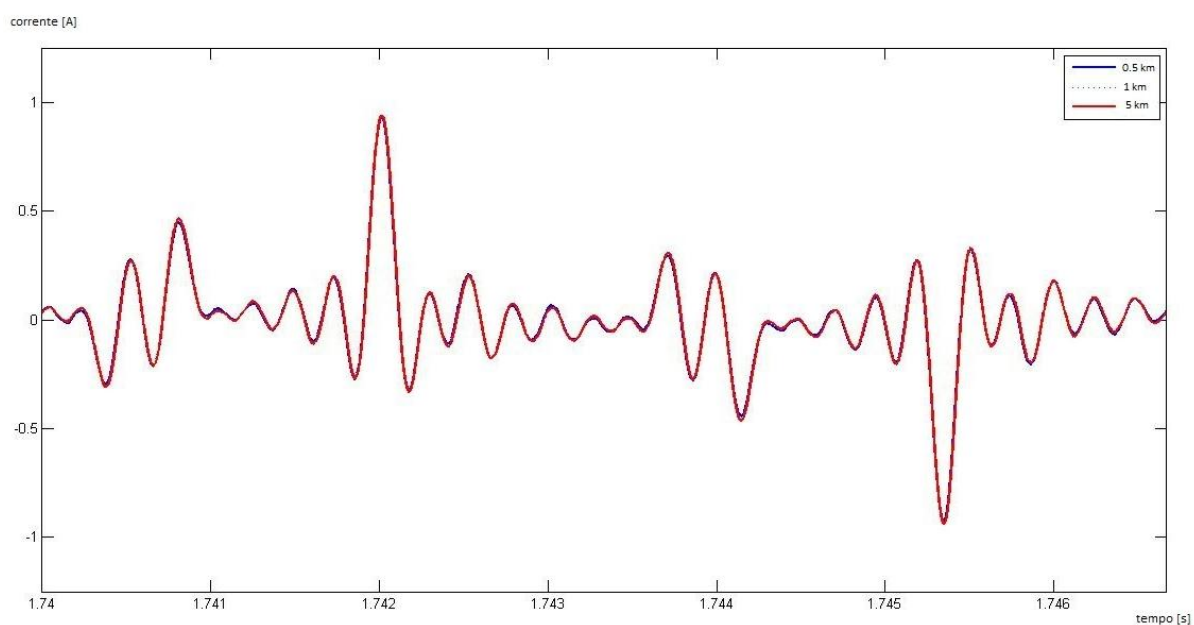


Grafico 5 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia al variare della lunghezza dei tratti con funi accessibili,  $T=6.67$  ms

A riprova della bontà della scelta fatta di non considerare come accettabile la rappresentazione della linea mediante nove tronconi in serie aventi funi di guardia accessibili e quindi messa a terra delle stesse ogni 110 km si sono posti a confronto nelle figure seguenti gli andamenti nel tempo della somma delle correnti nelle funi di guardia (calcolata in corrispondenza della prima sezione di misura) nel modello che si è scelto di usare e in quello “scartato”: le differenze sono evidenti, e questa è un’ulteriore conferma della scorrettezza della rappresentazione con fune di guardia sempre accessibile.

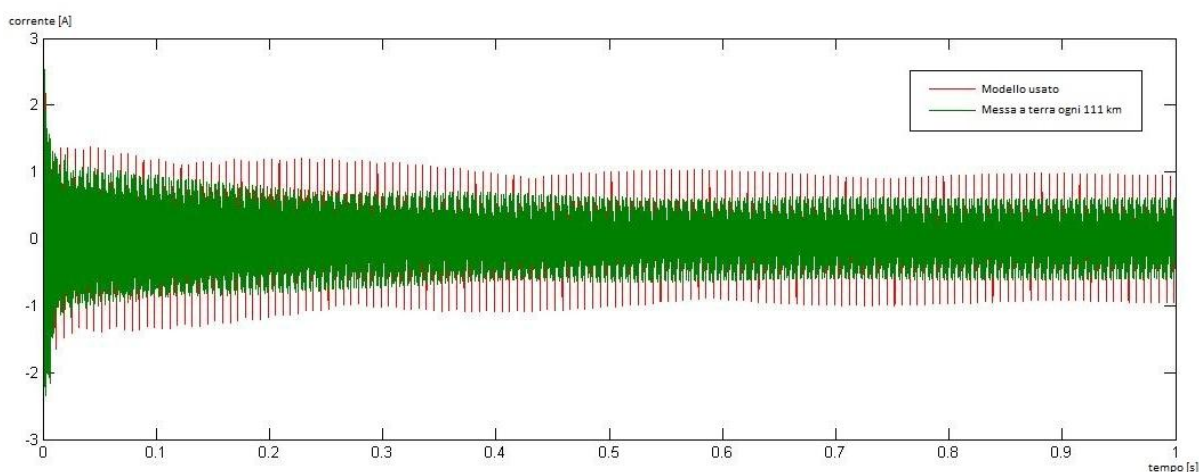


Grafico 6 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia, modelli a confronto.  $T=1$  s.

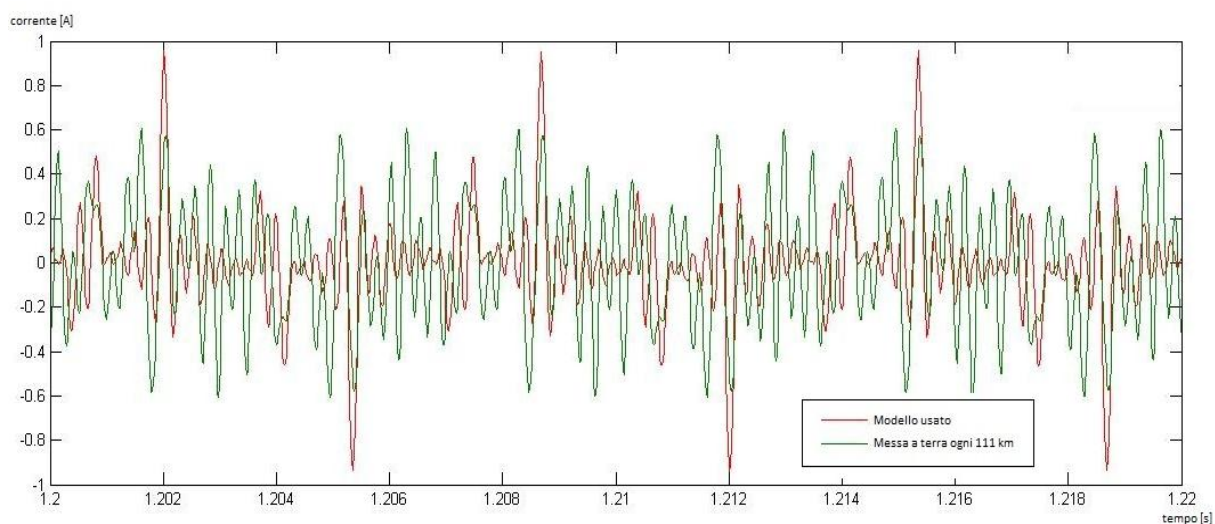


Grafico 7 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia, modelli a confronto.  $T=20$  ms

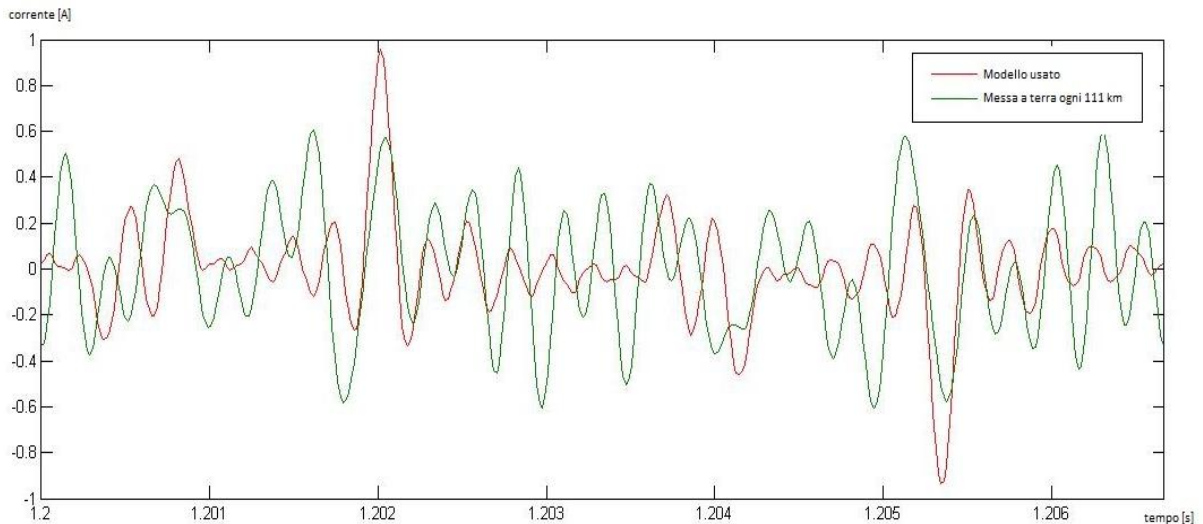


Grafico 8 - Andamento delle correnti nelle funi di guardia, modelli a confronto.  $T= 6.67$  ms

#### 4.2.3 Dimensionamento del trasformatore e calcolo della reattanza trasformatorica

La potenza di dimensionamento ( $A_d$ ) di un trasformatore alimentante un ponte a reazione esafase è data dalla formula seguente, ottenuta legando le tensioni e le correnti di fase al secondario del trasformatore ( $V_{2f}$ ,  $I_2$ ) con le tensioni lato corrente continua corrispondenti alla corrente nominale ( $V_{d0\_Idn}$ <sup>37</sup>) e la corrente raddrizzata nominale ( $I_{dn}$ ) attraverso le formule mutuata dalla teoria dei convertitori elettronici di potenza [17].

$$A_d = 3V_{2f}I_2 = 3 \left( \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{d0\_Idn} \right) \left( \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dn} \right) = \frac{\pi}{3} V_{d0\_Idn} I_{dn} \quad (4.4)$$

La tensione a vuoto si lega alla corrente e alla tensione nominale di un polo dell'impianto HVDC ( $V_d$ ) mediante la formula seguente:

$$\frac{V_d}{2} = V_{d0\_Idn} \cos(\alpha) - \frac{3X_t I_{dn}}{\pi} \quad (4.5) \quad ^{38}$$

<sup>37</sup> La tensione  $V_{d0\_Idn}$  è la tensione a vuoto del convertitore a reazione esafase.

<sup>38</sup> Si fa notare come la tensione nominale di un polo ( $V_d$ ) sia coincidente con la tensione nominale del convertitore a reazione dodecafase: la tensione del ponte a reazione esafase è pari alla metà di essa, quindi come indicato nella formula (4.5) a  $\frac{V_d}{2}$ .

In essa compaiono:

- la corrente  $I_{dn}$ , che si calcola partendo dalla portata dell'impianto  $P_n$  mediante la formula seguente:

$$I_{dn} = \frac{P_n}{2V_d} = 3000 \text{ A}$$

- La reattanza del trasformatore vista dal convertitore, che si può esprimere nella maniera seguente:

$$X_t = v_{cc} * \frac{(V_{2nom})^2}{A_d} \quad (4.6)$$

dove  $v_{cc}$  è la tensione di corto in per-unit (la si assume pari a 0.16) e  $V_{2nom}$  è la tensione concatenata secondaria nominale del trasformatore, pari a  $\frac{\pi * V_{d0\_Idn}}{3\sqrt{2}}$  (4.7).

Unendo le equazioni (4.4) e (4.6) si ottiene l'espressione

$$X_t = v_{cc} * \frac{(V_{2nom})^2}{\frac{\pi}{3} V_{d0\_Idn} I_{dn}} = v_{cc} * \frac{\pi V_{d0\_Idn}}{6 I_{dn}} \quad (4.8)$$

che, sostituita nell'equazione (4.5), permette di valutare la tensione  $V_{do\_Idn}$  risolvendo l'equazione

$$\frac{V_d}{2} = V_{d0\_Idn} \cos(\alpha) - \frac{v_{cc} * V_{d0\_Idn}}{2} \quad (4.9)$$

da cui infine si ottiene

$$V_{d0\_Idn} = \frac{V_d}{2 \left( \cos(\alpha) - \frac{v_{cc}}{2} \right)} = 282.19 \text{ kV} \quad (4.10)$$

Si ricava quindi una potenza di dimensionamento del trasformatore associato ad un ponte a reazione esafase pari a 886.5 MVA: questo valore – molto elevato – viene generalmente



raggiunto suddividendo la potenza tra più macchine. Quello che importa per i calcoli che verranno effettuati non è tanto la struttura del o dei trasformatori alimentanti ciascun ponte esafase quanto la reattanza vista dal convertitore, che è sempre la stessa e si calcola mediante la formula (4.6). Si ottiene quindi un valore di reattanza pari a  $X_t = 7.88 \Omega$ .

#### 4.2.4 Calcolo delle tensioni del modello a tre impulsi al variare della potenza trasmessa

Il calcolo della corrente perturbata equivalente deve essere effettuato per diversi valori di potenza trasmessa dall'impianto, in particolare per potenze che variano dalla nominale fino al 10% della stessa.

Si riporta di seguito la procedura per il calcolo di tutte le grandezze utili al fine di valutare le tensioni e le induttanze da inserire nei modelli a tre impulsi dei convertitori, per un valore generico di potenza trasmessa  $P$ .

##### 4.2.4.1 Raddrizzatore

La tensione in uscita dal convertitore funzionante da raddrizzatore si ottiene dalla formula seguente, che tiene conto della caduta di tensione dovuta al fenomeno della commutazione non istantanea delle valvole.

$$V_{d\_esa} = V_{d0} \cos(\alpha) - \frac{3X_t I_d}{\pi} \quad (4.11)$$

dove

$V_{d\_esa}$  è la tensione in uscita al ponte a reazione esafase funzionante da raddrizzatore – pari alla metà della complessiva tensione del ponte dodecafase ( $V_d$ ) che è mantenuta al valore costante di 500 kV;

$V_{d0}$  è la tensione continua a vuoto del convertitore a reazione esafase lato raddrizzatore, funzione della potenza trasmessa  $P$ ;

$\alpha$  è l'angolo di controllo di fase – mantenuto al valore di  $15^\circ$ ;

$X_t$  è la reattanza del trasformatore vista dal convertitore;

$I_d$  è la corrente raddrizzata circolante, anch'essa funzione della potenza  $P$ .

La corrente  $I_d$  si calcola banalmente dal rapporto  $\frac{P}{2V_d}$ ; nota  $I_d$ , l'unica variabile presente nell'equazione è la tensione  $V_{d0}$ ; invertendo la scrittura, si ottiene l'espressione seguente:

$$V_{d0} = \frac{1}{\cos(\alpha)} * \left( V_{d_{esa}} + \frac{3X_t I_d}{\pi} \right) \quad (4.12)$$

Oltre alla tensione  $V_{d0}$  – che compare nella formula che si utilizza per la valutazione delle tensioni armoniche dei generatori del modello a tre impulsi – occorre conoscere anche l'angolo di sovrapposizione  $u$ , che rientra nel calcolo del valore dell'induttanza da utilizzare nella modellizzazione del convertitore (vedi nota 29).

Si sa però che la corrente  $I_d$  è legata all'angolo  $u$  dalla formula:

$$I_d = \frac{\pi V_{d0}}{6X_t} [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + u)] \quad (4.13)$$

da cui deriva la valutazione dell'angolo  $u$  come

$$u = \left\{ \arccos \left[ \cos(\alpha) - \frac{6X_t I_d}{\pi V_{d0}} \right] \right\} - \alpha \quad (4.14)$$

Effettuata la valutazione lato raddrizzatore si può passare al calcolo delle grandezze lato invertitore

#### 4.2.4.2 Inverter

La tensione in uscita dal convertitore funzionante da inverter si ottiene dalla formula seguente,

$$V_{di\_esa} = V_{d0i} \cos(\gamma) - \frac{3X_t I_d}{\pi} \quad (4.15)$$

dove

$V_{di\_esa}$  è la tensione in uscita a ciascun ponte a reazione esafase funzionante da inverter, pari alla metà della tensione complessiva del ponte a reazione dodecafase ( $V_{di}$ );

$V_{doi}$  è la tensione continua a vuoto del convertitore a reazione esafase lato inverter, funzione della potenza trasmessa P;

$\gamma$  è l'angolo di estinzione dell'inverter – mantenuto al valore di  $17^\circ$ .

La tensione  $V_{di}$  - al contrario di quanto avviene per il raddrizzatore - non assume un valore costante; essa varia a seconda della caduta di tensione in corrente continua sulla linea.

Si ha quindi che

$$V_{di} = V_d - R_L I_d \quad (4.16)$$

dove  $R_L$  è la resistenza complessiva in corrente continua della linea, data dal prodotto della resistenza DC per unità di lunghezza del fascio di conduttori e la lunghezza della linea stessa: con i dati presentati al paragrafo 4.2.1 essa assume il valore di  $11.25 \Omega$ .

Nota  $V_{di}$  si può procedere come già descritto per il raddrizzatore: si calcola dapprima  $V_{doi}$  come

$$V_{doi} = \frac{1}{\cos(\gamma)} * \left( V_{di_{esa}} + \frac{3X_t I_d}{\pi} \right) \quad (4.17)$$

Nota  $V_{doi}$  è calcolabile l'angolo di sovrapposizione delle valvole dell'inverter ( $u_i$ ) mediante l'espressione

$$u_i = \left\{ \arccos \left[ \cos(\gamma) - \frac{6X_t I_d}{\pi V_{d0}} \right] \right\} - \gamma \quad (4.18)$$

Effettuando i passaggi qui descritti per ogni valore di potenza P di interesse, si ottengono i valori delle grandezze che sono necessari al fine dell'implementazione dei modelli a tre impulsi dei convertitori.

Nella tabella che segue sono riportati i valori che si ottengono svolgendo i calcoli sopra descritti, nonché le induttanze del modello a tre impulsi del raddrizzatore (L) e dell'inverter ( $L_i$ ) al variare della potenza.

P [MW]	$V_{d0}$ [V]	$V_{di\_esa}$ [V]	$V_{d0i}$ [V]	$u$ [°]	L [mH]	$u_i$ [°]	$L_i$ [mH]
300	261156	248313	262019	3,44	12,18	3,10	12,22
600	263493	246625	262615	6,31	11,88	5,79	11,94
900	265830	244938	263211	8,80	11,62	8,20	11,68
1200	268167	243250	263807	11,03	11,39	10,40	11,46
1500	270504	241563	264403	13,06	11,18	12,43	11,24
1800	272842	239875	264999	14,93	10,98	14,34	11,04
2100	275179	238188	265595	16,67	10,80	16,14	10,85
2400	277516	236500	266191	18,30	10,63	17,85	10,68
2700	279853	234813	266787	19,84	10,47	19,49	10,51
3000	282190	233125	267383	21,30	10,32	21,05	10,34
3300	284527	231438	267979	22,69	10,18	22,56	10,18

Tabella 11 - Valori delle grandezze  $V_{d0}$ ,  $u$ , L al variare della potenza trasmessa

Gli angoli di sovrapposizione delle valvole dei ponti hanno una grande importanza per quanto riguarda il contenuto armonico delle tensioni generate dal ponte stesso: con angolo di controllo di fase costante, il peso delle diverse componenti armoniche cresce o diminuisce in funzione degli angoli  $u$  (raddrizzatore) e  $u_i$  (inverter), come si evince dalla figura seguente<sup>39</sup>:

<sup>39</sup> Fonte: "Reactive Power Compensation and Harmonic Filters for HVDC Classic", ABB Group.  
[http://www.sari-energy.org/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Workshop\\_Sep\\_2011/presentations/Reactive%20Power%20and%20Harmonic%20Filter\\_ABB.pdf](http://www.sari-energy.org/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Workshop_Sep_2011/presentations/Reactive%20Power%20and%20Harmonic%20Filter_ABB.pdf)

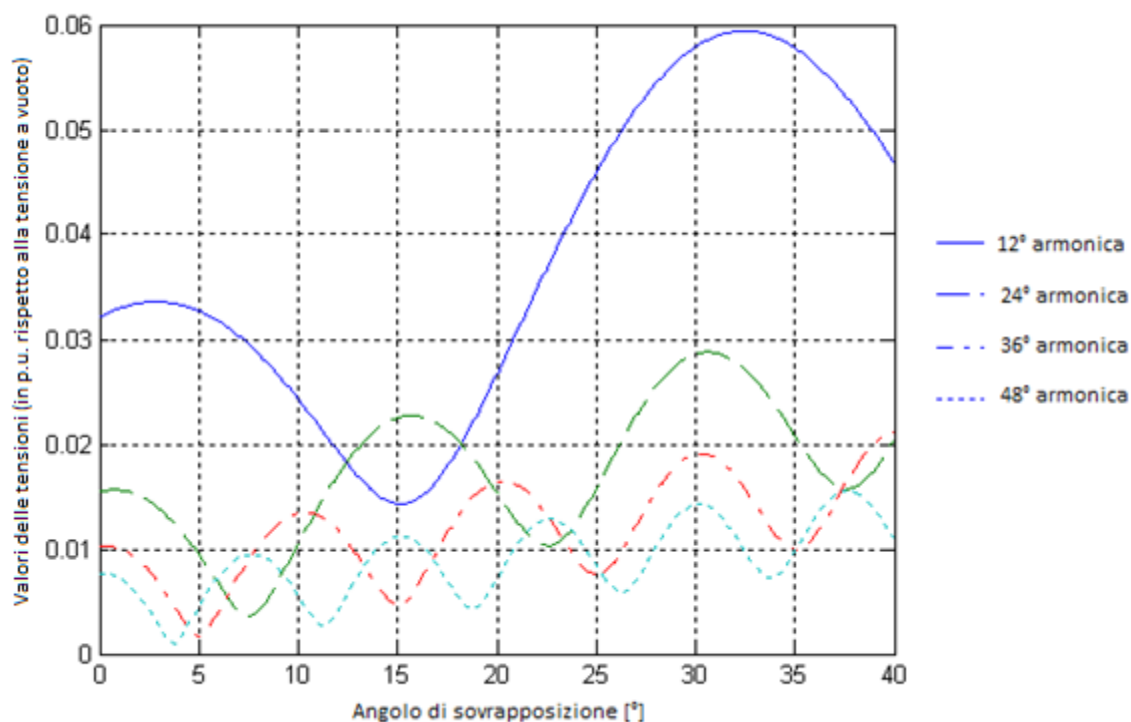


Grafico 9 - Andamento delle armoniche caratteristiche di tensione in funzione dell'angolo di sovrapposizione, per un ponte avente angolo di controllo di fase  $\alpha=15^\circ$ . Tensioni espresse in valore relativo rispetto alla tensione nominale a vuoto del convertitore a reazione dodecafase.

Nelle pagine seguenti si riportano i valori delle tensioni del modello a tre impulsi, calcolate per i valori di potenza trasmessa che verranno utilizzati nelle fasi successive del lavoro, per entrambi i ponti (raddrizzatore ed inverter).

MODELLO A TRE IMPULSI RADDRIZZATORE, P=300 MW								
	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
Ordine di armonicità								
3	41659	6109	-41659	-6109	-6109	41659	6109	-41659
6	-11171	-9414	-11171	-9414	11171	9414	11171	9414
9	1196	8687	-1196	-8687	8687	-1196	-8687	1196
12	3821	-4868	3821	-4868	3821	-4868	3821	-4868
15	-4682	333	4682	-333	-333	-4682	333	4682
18	2626	2603	2626	2603	-2626	-2603	-2626	-2603
21	217	-2966	-217	2966	-2966	-217	2966	217
24	-1957	1418	-1957	1418	-1957	1418	-1957	1418
27	1908	488	-1908	-488	-488	1908	488	-1908
30	-677	-1450	-677	-1450	677	1450	677	1450
33	-565	1157	565	-1157	1157	565	-1157	-565
36	997	-219	997	-219	997	-219	997	-219
39	-604	-506	604	506	506	-604	-506	604
42	-38	584	-38	584	38	-584	38	-584
45	355	-205	-355	205	-205	-355	205	355
48	-222	-142	-222	-142	-222	-142	-222	-142
51	-60	150	60	-150	-150	-60	150	60
54	131	78	131	78	-131	-78	-131	-78
57	77	-207	-77	207	-207	-77	207	77
60	-304	37	-304	37	-304	37	-304	37
63	252	296	-252	-296	-296	252	296	-252
66	108	-450	108	-450	-108	450	-108	450
69	-484	214	484	-214	214	484	-214	-484
72	516	276	516	276	516	276	516	276
75	-114	-623	114	623	623	-114	-623	114
78	-440	509	-440	509	440	-509	440	-509
81	705	23	-705	-23	23	-705	-23	705
84	-441	-581	-441	-581	-441	-581	-441	-581

Tabella 12 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso P=300 MW

MODELLO A TRE IMPULSI INVERTER, P=300 MW								
	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
Ordine di armonicità								
3	43305	8127	-43305	-8127	-8127	43305	8127	-43305
6	-10531	-11823	-10531	-11823	10531	11823	10531	11823
9	-1059	9591	1059	-9591	9591	1059	-9591	-1059
12	5834	-3644	5834	-3644	5834	-3644	5834	-3644
15	-4905	-1922	4905	1922	1922	-4905	-1922	4905
18	1037	4064	1037	4064	-1037	-4064	-1037	-4064
21	2220	-2596	-2220	2596	-2596	-2220	2596	2220
24	-2804	-282	-2804	-282	-2804	-282	-2804	-282
27	1126	2052	-1126	-2052	-2052	1126	2052	-1126
30	884	-1734	884	-1734	-884	1734	-884	1734
33	-1602	197	1602	-197	197	1602	-197	-1602
36	866	1006	866	1006	866	1006	866	1006
39	295	-1037	-295	1037	1037	295	-1037	-295
42	-822	252	-822	252	822	-252	822	-252
45	504	435	-504	-435	435	-504	-435	504
48	85	-486	85	-486	85	-486	85	-486
51	-325	108	325	-108	-108	-325	108	325
54	137	165	137	165	-137	-165	-137	-165
57	95	-83	-95	83	-83	-95	83	95
60	-50	-122	-50	-122	-50	-122	-50	-122
63	-176	101	176	-101	-101	-176	101	176
66	229	170	229	170	-229	-170	-229	-170
69	48	-359	-48	359	-359	-48	359	48
72	-398	173	-398	173	-398	173	-398	173
75	410	281	-410	-281	-281	410	281	-410
78	15	-553	15	-553	-15	553	-15	553
81	-512	316	512	-316	316	512	-316	-512
84	583	271	583	271	583	271	583	271

Tabella 13 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso P=300 MW

MODELLO A TRE IMPULSI RADDRIZZATORE, P=1200 MW								
	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
Ordine di armonicità								
3	45348	12426	-45348	-12426	-12426	45348	12426	-45348
6	-6876	-14318	-6876	-14318	6876	14318	6876	14318
9	-4636	6550	4636	-6550	6550	4636	-6550	-4636
12	3988	1036	3988	1036	3988	1036	3988	1036
15	407	-1891	-407	1891	1891	407	-1891	-407
18	-1057	-993	-1057	-993	1057	993	1057	993
21	-1557	1379	1557	-1379	1379	1557	-1379	-1557
24	2239	1429	2239	1429	2239	1429	2239	1429
27	547	-2917	-547	2917	2917	547	-2917	-547
30	-2938	696	-2938	696	2938	-696	2938	-696
33	1749	2246	-1749	-2246	2246	-1749	-2246	1749
36	1159	-2215	1159	-2215	1159	-2215	1159	-2215
39	-2024	-142	2024	142	142	-2024	-142	2024
42	441	1423	441	1423	-441	-1423	-441	-1423
45	806	-503	-806	503	-503	-806	503	806
48	-232	-491	-232	-491	-232	-491	-232	-491
51	-567	-46	567	46	46	-567	-46	567
54	-60	877	-60	877	60	-877	60	-877
57	1141	-264	-1141	264	-264	-1141	264	1141
60	-781	-1122	-781	-1122	-781	-1122	-781	-1122
63	-757	1235	757	-1235	-1235	-757	1235	757
66	1406	179	1406	179	-1406	-179	-1406	-179
69	-372	-1227	372	1227	-1227	372	1227	-372
72	-817	685	-817	685	-817	685	-817	685
75	692	392	-692	-392	-392	692	392	-692
78	147	-489	147	-489	-147	489	-147	489
81	-270	-147	270	147	-147	270	147	-270
84	-308	207	-308	207	-308	207	-308	207

Tabella 14 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso P=1200 MW



MODELLO A TRE IMPULSI INVERTER, P=1200 MW								
	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
Ordine di armonicità								
3	45700	14562	-45700	-14562	-14562	45700	14562	-45700
6	-5297	-15821	-5297	-15821	5297	15821	5297	15821
9	-6282	5954	6282	-5954	5954	6282	-5954	-6282
12	4064	2182	4064	2182	4064	2182	4064	2182
15	845	-2031	-845	2031	2031	845	-2031	-845
18	-711	-998	-711	-998	711	998	711	998
21	-1702	357	1702	-357	357	1702	-357	-1702
24	810	2265	810	2265	810	2265	810	2265
27	2296	-1670	-2296	1670	1670	2296	-1670	-2296
30	-2477	-1729	-2477	-1729	2477	1729	2477	1729
33	-765	2879	765	-2879	2879	765	-2879	-765
36	2739	-259	2739	-259	2739	-259	2739	-259
39	-1021	-2150	1021	2150	2150	-1021	-2150	1021
42	-1361	1338	-1361	1338	1361	-1338	1361	-1338
45	1215	665	-1215	-665	665	-1215	-665	1215
48	272	-822	272	-822	272	-822	272	-822
51	-405	-243	405	243	243	-405	-243	405
54	-483	177	-483	177	483	-177	483	-177
57	243	795	-243	-795	795	-243	-795	243
60	977	-561	977	-561	977	-561	977	-561
63	-983	-903	983	903	903	-983	-903	983
66	-569	1322	-569	1322	569	-1322	569	-1322
69	1437	85	-1437	-85	85	-1437	-85	1437
72	-383	-1287	-383	-1287	-383	-1287	-383	-1287
75	-941	684	941	-684	-684	-941	684	941
78	748	541	748	541	-748	-541	-748	-541
81	237	-603	-237	603	-603	-237	603	237
84	-361	-121	-361	-121	-361	-121	-361	-121

Tabella 15 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso P=1200 MW

MODELLO A TRE IMPULSI RADDRIZZATORE, P=2100 MW								
	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
Ordine di armonicità								
3	46897	19253	-46897	-19253	-19253	46897	19253	-46897
6	-654	-15410	-654	-15410	654	15410	654	15410
9	-5811	485	5811	-485	485	5811	-485	-5811
12	-1919	2425	-1919	2425	-1919	2425	-1919	2425
15	2055	3790	-2055	-3790	-3790	2055	3790	-2055
18	4316	-2890	4316	-2890	-4316	2890	-4316	2890
21	-3656	-3615	3656	3615	-3615	3656	3615	-3656
24	-2329	3661	-2329	3661	-2329	3661	-2329	3661
27	2840	1207	-2840	-1207	-1207	2840	1207	-2840
30	745	-1593	745	-1593	-745	1593	-745	1593
33	-486	-1009	486	1009	-1009	486	1009	-486
36	-1684	-69	-1684	-69	-1684	-69	-1684	-69
39	0	2299	0	-2299	-2299	0	2299	0
42	2490	-445	2490	-445	-2490	445	-2490	445
45	-868	-2174	868	2174	-2174	868	2174	-868
48	-1550	948	-1550	948	-1550	948	-1550	948
51	603	958	-603	-958	-958	603	958	-603
54	678	0	678	0	-678	0	-678	0
57	565	-788	-565	788	-788	-565	788	565
60	-1142	-840	-1142	-840	-1142	-840	-1142	-840
63	-754	1475	754	-1475	-1475	-754	1475	754
66	1557	435	1557	435	-1557	-435	-1557	-435
69	125	-1321	-125	1321	-1321	-125	1321	125
72	-880	-31	-880	-31	-880	-31	-880	-31
75	-222	455	222	-455	-455	-222	455	222
78	237	593	237	593	-237	-593	-237	-593
81	944	-289	-944	289	-289	-944	289	944
84	-517	-1097	-517	-1097	-517	-1097	-517	-1097

Tabella 16 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso P=2100 MW

MODELLO A TRE IMPULSI INVERTER, P=2100 MW								
	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
Ordine di armonicità								
3	45887	21345	-45887	-21345	-21345	45887	21345	-45887
6	1273	-15685	1273	-15685	-1273	15685	-1273	15685
9	-5965	-482	5965	482	-482	5965	482	-5965
12	-2206	1729	-2206	1729	-2206	1729	-2206	1729
15	285	4027	-285	-4027	-4027	285	4027	-285
18	5086	-352	5086	-352	-5086	352	-5086	352
21	-987	-5134	987	5134	-5134	987	5134	-987
24	-4334	1496	-4334	1496	-4334	1496	-4334	1496
27	1484	3093	-1484	-3093	-3093	1484	3093	-1484
30	1881	-888	1881	-888	-1881	888	-1881	888
33	90	-1058	-90	1058	-1058	-90	1058	90
36	-765	-1112	-765	-1112	-765	-1112	-765	-1112
39	-1854	918	1854	-918	-918	-1854	918	1854
42	1268	2132	1268	2132	-1268	-2132	-1268	-2132
45	1951	-1530	-1951	1530	-1530	-1951	1530	1951
48	-1494	-1485	-1494	-1485	-1494	-1485	-1494	-1485
51	-981	1106	981	-1106	-1106	-981	1106	981
54	466	660	466	660	-466	-660	-466	-660
57	624	223	-624	-223	223	-624	-223	624
60	754	-838	754	-838	754	-838	754	-838
63	-1152	-997	1152	997	997	-1152	-997	1152
66	-945	1383	-945	1383	945	-1383	945	-1383
69	1389	706	-1389	-706	706	-1389	-706	1389
72	447	-1132	447	-1132	447	-1132	447	-1132
75	-685	-317	685	317	317	-685	-317	685
78	-389	191	-389	191	389	-191	389	-191
81	-196	634	196	-634	634	196	-634	-196
84	940	381	940	381	940	381	940	381

Tabella 17 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso P=2100 MW

MODELLO A TRE IMPULSI RADDRIZZATORE, P=3000 MW								
Ordine di armonicità	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
3	46760	25957	-46760	-25957	-25957	46760	25957	-46760
6	5083	-13217	5083	-13217	-5083	13217	-5083	13217
9	-2271	-4525	2271	4525	-4525	2271	4525	-2271
12	-6034	-2091	-6034	-2091	-6034	-2091	-6034	-2091
15	-3104	6835	3104	-6835	-6835	-3104	6835	3104
18	6167	2593	6167	2593	-6167	-2593	-6167	-2593
21	1861	-4226	-1861	4226	-4226	-1861	4226	1861
24	-1744	-1626	-1744	-1626	-1744	-1626	-1744	-1626
27	-1989	-446	1989	446	446	-1989	-446	1989
30	-1779	2582	-1779	2582	1779	-2582	1779	-2582
33	2885	2149	-2885	-2149	2149	-2885	-2149	2885
36	1858	-2541	1858	-2541	1858	-2541	1858	-2541
39	-1540	-1385	1540	1385	1385	-1540	-1385	1540
42	-1117	201	-1117	201	1117	-201	1117	-201
45	-1014	1171	1014	-1171	1171	1014	-1171	-1014
48	1384	1735	1384	1735	1384	1735	1384	1735
51	1849	-1460	-1849	1460	1460	1849	-1460	-1849
54	-1164	-1516	-1164	-1516	1164	1516	1164	1516
57	-1043	471	1043	-471	471	1043	-471	-1043
60	-422	706	-422	706	-422	706	-422	706
63	609	1205	-609	-1205	-1205	609	1205	-609
66	1615	-659	1615	-659	-1615	659	-1615	659
69	-651	-1569	651	1569	-1569	651	1569	-651
72	-1183	413	-1183	413	-1183	413	-1183	413
75	-83	694	83	-694	-694	-83	694	83
78	323	700	323	700	-323	-700	-323	-700
81	1208	-163	-1208	163	-163	-1208	163	1208
84	-152	-1415	-152	-1415	-152	-1415	-152	-1415

Tabella 18 - Valori delle tensioni del modello a tre impulsi del raddrizzatore, nel caso P=3000 MW

MODELLO A TRE IMPULSI INVERTER, P=3000 MW								
	$V_{3p}(t)$		$V_{3p}(t-T/6)$		$V_{3p}(t-T/12)$		$V_{3p}(t-3T/12)$	
	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$	$-1^k a_{3k}$	$-1^k b_{3k}$
Ordine di armonicità								
3	44259	27848	-44259	-27848	-27848	44259	27848	-44259
6	6755	-12115	6755	-12115	-6755	12115	-6755	12115
9	-965	-4593	965	4593	-4593	965	4593	-965
12	-4633	-4162	-4633	-4162	-4633	-4162	-4633	-4162
15	-5904	4626	5904	-4626	-4626	-5904	4626	5904
18	3901	5547	3901	5547	-3901	-5547	-3901	-5547
21	4100	-2387	-4100	2387	-2387	-4100	2387	4100
24	-394	-2379	-394	-2379	-394	-2379	-394	-2379
27	-935	-1571	935	1571	1571	-935	-1571	935
30	-3003	6	-3003	6	3003	-6	3003	-6
33	-445	3564	445	-3564	3564	445	-3564	-445
36	3191	614	3191	614	3191	614	3191	614
39	724	-2089	-724	2089	2089	724	-2089	-724
42	-649	-911	-649	-911	649	911	649	911
45	-1169	-697	1169	697	-697	1169	697	-1169
48	-1612	1376	-1612	1376	-1612	1376	-1612	1376
51	1370	1946	-1370	-1946	-1946	1370	1946	-1370
54	1748	-1040	1748	-1040	-1748	1040	-1748	1040
57	-397	-1214	397	1214	-1214	397	1214	-397
60	-588	-419	-588	-419	-588	-419	-588	-419
63	-1180	67	1180	-67	-67	-1180	67	1180
66	-256	1659	-256	1659	256	-1659	256	-1659
69	1709	399	-1709	-399	399	-1709	-399	1709
72	449	-1321	449	-1321	449	-1321	449	-1321
75	-623	-498	623	498	498	-623	-498	623
78	-590	-166	-590	-166	590	166	590	166
81	-821	699	821	-699	699	821	-699	-821
84	745	1180	745	1180	745	1180	745	1180

Tabella 19- Valori delle tensioni del modello a tre impulsi dell'inverter, nel caso P=3000 MW

A livello di software, ciascun generatore è stato implementato come una sorgente di tensione pilotata da 56 segnali (28 onde sinusoidali e 28 cosinusoidali), oscillanti alle frequenze di interesse (armoniche di ordine  $3n$  della fondamentale – 50 Hz), ampiezze pari ai coefficienti  $(-1^k a_{3k})$  e  $(-1^k b_{3k})$  riportati nelle tabelle 11/12 e fase pari a  $0$  o  $-180^\circ$  a seconda del segno positivo o negativo dei coefficienti stessi.

La verifica della correttezza dell'implementazione dei generatori del modello a tre impulsi si è avuta misurando la tensione ai capi di ciascun ponte, dopo aver collegato in serie i generatori (bypassando quindi le capacità di dispersione) cortocircuitando le induttanze: si sono ottenuti profili di tensioni i cui spettri comprendono solo – come giusto che sia – le armoniche caratteristiche: senza vie di richiusura delle correnti, infatti, le fasi delle sorgenti ideali di tensione sono tali da avere la cancellazione reciproca di tutte le armoniche avente ordine diverso da  $12*n$ . A titolo di esempio si riporta lo spettro delle tensioni prodotte da uno dei due ponti a reazione dodecafase funzionanti da raddrizzatore, nel caso di potenza trasmessa pari alla nominale. Si può verificare come i valori di tensioni siano in linea con quanto illustrato nel Grafico 9: si ricorda che (vedi Tabella 11) a potenza nominale l'angolo di sovrapposizione del raddrizzatore è pari a  $21.3^\circ$ .

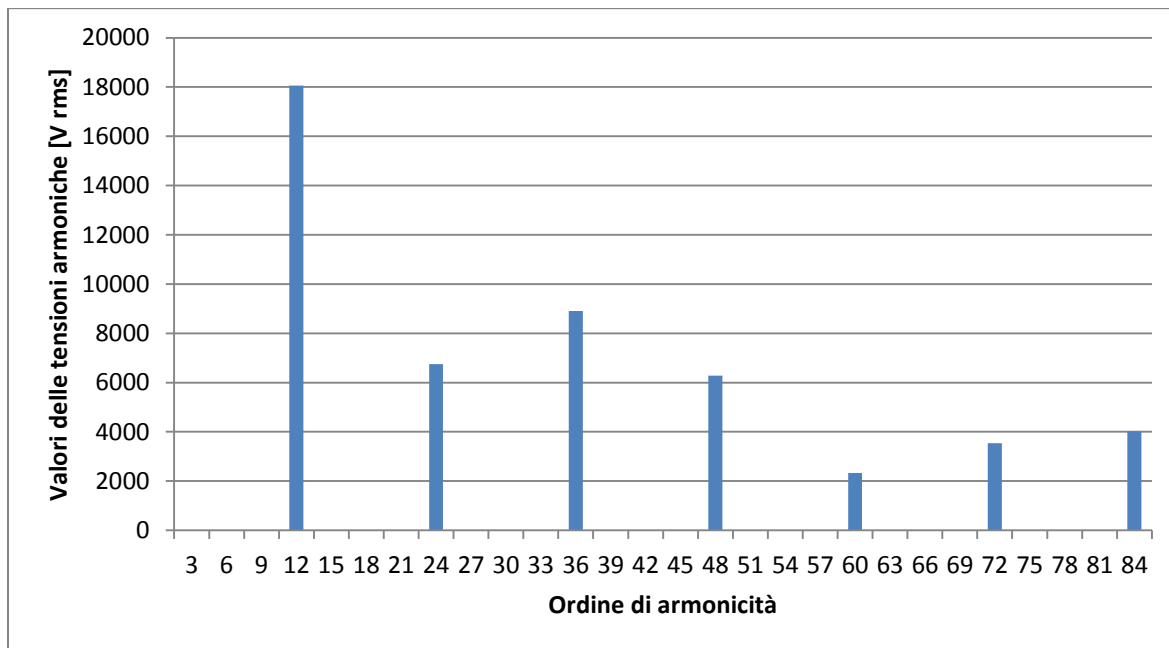


Grafico 10 – Verifica della correttezza dell'implementazione del modello a tre impulsi: spettro delle tensioni prodotte dal ponte, eliminate le vie di richiusura a terra attraverso le capacità parassite

---

### 4.2.5 Configurazioni dell'impianto

Come già più volte indicato, l'analisi sui disturbi indotti va compiuta in due condizioni di funzionamento distinte, quella bipolare (bilanciata) e quella monopolare. In particolare, si è scelto di implementare la condizione di funzionamento monopolare utilizzando come conduttore di ritorno il polo fuori servizio del collegamento di potenza, quindi il cosiddetto *monopolare con ritorno metallico*, e non il funzionamento con via di richiusura della corrente nel terreno.

Per quando riguarda le messe a terra dei neutri delle stazioni, invece, in entrambe le condizioni di funzionamento è messa a terra direttamente la stazione funzionante da raddrizzatore, mentre si è rappresentato un condensatore di neutro nell'altra stazione, il cui dimensionamento verrà approfondito nel paragrafo 5.1.4.

Non si è inoltre rappresentata la linea di neutro, in quanto si è ipotizzato che la messa a terra del neutro avvenisse in prossimità della stazione stessa.

## 4.3 Misure effettuate

Obiettivo della tesi è quello di analizzare le prestazioni di diversi filtri e di effettuarne l'ottimizzazione.

La valutazione delle performance di ciascun filtro avviene simulandone il comportamento all'interno del sistema HVDC (sia bipolare che monopolare), e misurando la corrente perturbata equivalente nelle dieci sezioni di misura di cui già si è parlato.

Entrando più nel dettaglio, si ricorda come la  $I_{eq}$  sia una grandezza pesata che contiene al suo interno le correnti armoniche di modo comune che circolano in tutti i conduttori dell'impianto<sup>40</sup>. Per valutarla, all'inizio della linea e al termine di ciascuno dei nove tratti descritti al paragrafo 4.2.2 si è misurata la somma nel dominio del tempo delle correnti fluenti nei conduttori di polo e nelle funi di guardia (questo è stato possibile – come già ampiamente argomentato – grazie alla presenza dei tratti con fune di guardia accessibile).

---

<sup>40</sup> Si intende qui “conduttori posti all'esterno delle stazioni di conversione”, laddove cioè vi possono essere tratti di parallelismo con linee telefoniche adiacenti.

Di queste grandezze si è quindi svolta la trasformata di Fourier<sup>41</sup> al fine di ricavarne lo spettro armonico: ottenuto questo, sono noti tutti i termini per la valutazione della corrente perturbata equivalente, che si ricorda essere data dalla formula già introdotta al paragrafo 3.2.2.1.

$$I_{eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_n C_n H_n)^2} \quad (4.19)$$

Se si fossero misurate queste correnti accendendo contemporaneamente i generatori dei raddrizzatori e degli inverter si sarebbe implicitamente imposta una relazione di fase tra le tensioni armoniche prodotte dalle due stazioni. Supporre una qualsivoglia relazione di fase è scorretto, in quanto nulla si può dire sulle fasi dei due sistemi AC interconnessi mediante l'impianto HVDC oggetto di studio. Si sono quindi dovute accendere separatamente le due stazioni, valutando le correnti e quindi la corrente perturbata equivalente prodotta in ciascuna sezione di misura in due step, in modo da determinare separatamente i contributi prodotto dal solo raddrizzatore ( $I_{eq,r}$ ) e dal solo inverter ( $I_{eq,i}$ ), unendoli poi per ottenere la  $I_{eq}$  complessiva utilizzando la formula (3.5). Questo è stato fatto mediante una classica sovrapposizione degli effetti, cortocircuitando i generatori del modello a tre impulsi dell'inverter quando si è valutato il contributo alla corrente perturbata equivalente prodotto dal raddrizzatore e viceversa.

Questa accensione consecutiva e alternata delle due stazioni appare evidente osservando l'andamento nel tempo delle correnti. Si riporta di seguito l'andamento della somma delle quattro correnti di interesse (le correnti nei due poli e nelle due funi di guardia) in corrispondenza della stazione funzionante da invertitore<sup>42</sup>. Si nota come si abbiano due

---

<sup>41</sup> In un intervallo pari ad un periodo della fondamentale, ossia a 20 ms.

<sup>42</sup> Da questo punto in poi, quando si parlerà delle simulazioni si intenderà sempre – salvo specificazioni differenti – che esse sono state effettuate nelle seguenti condizioni: reattore di spianamento di induttanza pari a 250 mH; potenza trasmessa  $P=P_n=3000$  MW.



regimi consecutivi, il primo nel caso “raddrizzatore acceso/inverter spento<sup>43</sup>” e l’altro nelle condizioni speculari.

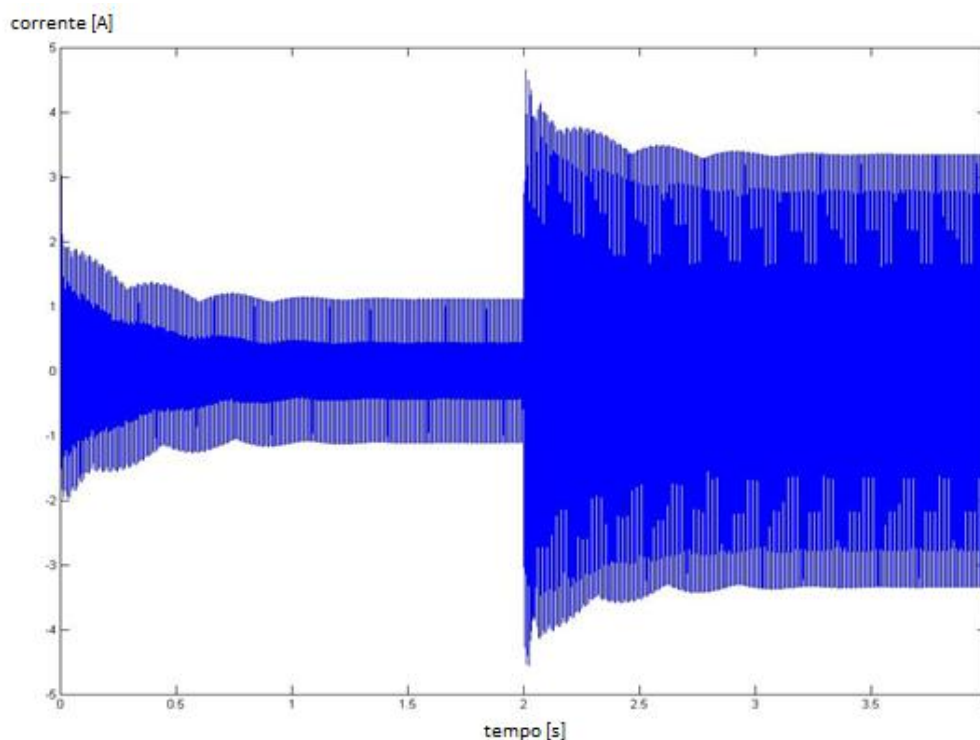


Grafico 11 - Andamento nel tempo delle correnti nella sezione di misura 1

Notazione: Le sezioni di misura sono state numerate in maniera crescente (da “1” a “10”) all’aumentare della distanza dalla stazione funzionante da raddrizzatore. Si indicherà, ad esempio, come “ $I_1$ ” la corrente valutata nella sezione di misura posta all’uscita della stazione raddrizzatrice, mentre con la dicitura “ $I_{10}$ ” si farà riferimento alla corrente in corrispondenza dei morsetti della stazione invertitrice. Lo stesso vale ad esempio con i termini  $I_{eq1}$  o  $I_{eq10}$ .

I risultati che da ciascuna sezione di misura si ottengono sono quindi i seguenti:

- valori efficaci di ciascuna delle 28 armoniche di corrente prodotte dal raddrizzatore;
- valori efficaci di ciascuna delle 28 armoniche di corrente prodotte dall’inverter;

---

<sup>43</sup> Si specifica che con l’espressione “inverter spento” si intende che nel modello a tre impulsi si sono azzerate le tensioni prodotte dei generatori, quindi il convertitore viene rappresentato dalle sole induttanze.

- corrente perturbata equivalente dovuta al funzionamento del solo raddrizzatore;
- corrente perturbata equivalente dovuta al funzionamento del solo inverter;
- corrente perturbata equivalente complessiva.

In aggiunta, si è scelto anche di calcolare i valori efficaci delle forme d'onda di corrente che fluiscono nei rami dei convertitori. In particolare le grandezze misurate sono le seguenti (in figura 20 si riporta il raddrizzatore con indicate le correnti misurate e le notazioni utilizzate: allo stesso modo si sono misurate le grandezze lato inverter<sup>44</sup>). Si nota come le correnti  $I_{\text{conv}_r3\text{sup}}$  e  $I_{\text{conv}_r1\text{inf}}$  siano anche le correnti che circolano nei reattori di spianamento lato raddrizzatore.

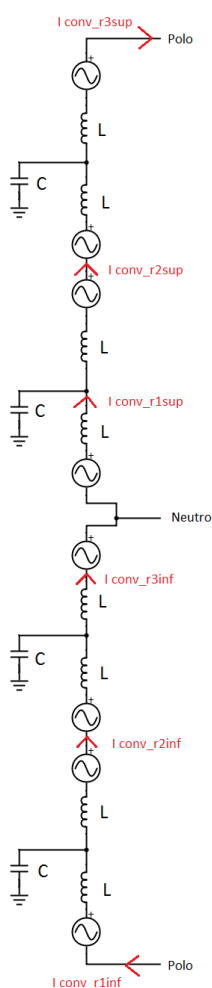


Figura 20 - Correnti circolanti nel ponte raddrizzatore - notazione

<sup>44</sup> Nota: le correnti lato inverter si indicano allo stesso modo rispetto a quelle misurate lato raddrizzatore, sostituendo la 'r' con la 'i': in tal modo, ad esempio, la corrente corrispondente alla  $I_{\text{conv}_r2\text{inf}}$  sarà la  $I_{\text{conv}_i2\text{inf}}$ ; le correnti circolanti nei reattori di spianamento lato inverter sono quindi le  $I_{\text{conv}_i3\text{sup}}$  e la  $I_{\text{conv}_i1\text{inf}}$ .

## 5 SIMULAZIONE

### 5.1 Parametri della simulazione

#### 5.1.1 Durata della simulazione

Al fine di avere risultati corretti è necessario che la trasformata di Fourier sia calcolata quando le correnti hanno raggiunto il regime. Come si evince dall'andamento delle correnti nel tempo – riportato ad esempio nel Grafico 11 – esso si raggiunge dopo 1.5 s dall'accensione del ponte. Per mantenere un certo margine di sicurezza, si è scelto che ciascuna simulazione durasse 4 secondi, 2 con raddrizzatore acceso e inverter spento e 2 con la situazione opposta. Le trasformate di Fourier sono calcolate rispettivamente in intervalli di 20 ms che iniziano 1.95 e 3.95 secondi dopo l'avvio della simulazione.

#### 5.1.2 Passo di calcolo

Come già introdotto nel paragrafo 4.2.2, il passo di calcolo deve essere inferiore alla minore delle costanti di propagazione delle linee, che nel caso in cui si scelgano segmenti con lunghezza minima di 5 km è pari a 16,873  $\mu$ s. Inoltre, affinché la trasformata di Fourier dia risultati corretti, occorre che la frequenza di campionamento sia multipla intera della fondamentale, e sia inoltre maggiore del doppio della massima frequenza presente nei segnali d'interesse. Essendo la massima armonica di tensione generata dal ponte l'84-esima (corrispondente ad una frequenza di 4200 Hz) si è scelto un passo di calcolo (equivalente al periodo di campionamento)  $T_s = 16 \mu$ s, ossia una frequenza di campionamento  $f_s = 62500$  Hz; essa rispetta entrambi i requisiti indicati.

### 5.1.3 Reattore di spianamento

Elemento fondamentale che costituisce parte del sistema di filtraggio è il reattore di spianamento. Proprio per questa sua importanza non si è ritenuto fosse corretto ipotizzarne un valore a priori: si è quindi deciso di mantenere il valore dell'induttanza di spianamento parametrico, e che esso potesse assumere i valori 250 mH, 300 mH, 350 mH. Questi valori sono paragonabili con le taglie dei reattori installati in impianti reali aventi potenze nominali simili a quella dell'impianto oggetto di studio, che sono riportate nella tabella seguente [18,19]:

Impianto	Potenza [MW]	Tensione [kV]	Induttanza reattore di spianamento [mH]
Three Gorges – Changzhou	3000	±500	270
Three Gorges – Guangdong	3000	±500	290
Gui-Guang	3000	±500	270

Tabella 20 - Valori dei reattori di spianamento installati in impianti reali

Si è scelto di rappresentare il reattore di spianamento come un'induttanza pura (senza quindi la resistenza serie che modella le perdite ohmiche) in quanto si è verificato come l'andamento delle correnti fosse sostanzialmente identico in due casi distinti:

caso 1: Reattore di spianamento rappresentato come un'induttanza pura;

caso 2: Reattore di spianamento rappresentato come un'induttanza con in serie una resistenza, fattore di merito  $QF=100$ ; essendo questo valore del Q-factor più basso dei casi reali (e quindi essendoci posti in una condizione che sovrastimasse la resistenza) il fatto che gli andamenti delle correnti fossero (quasi) identici in queste condizioni ha portato ad affermare che a maggior ragione in casi reali la presenza o meno della resistenza ha un impatto trascurabile sugli andamenti delle correnti armoniche.

Nelle figure che seguono si confrontano gli andamenti nel tempo delle correnti: a regime è evidente come i grafici siano di fatto sovrapposti, quindi la modellizzazione del reattore di spianamento come un'induttanza pura si possa considerare accettabile.

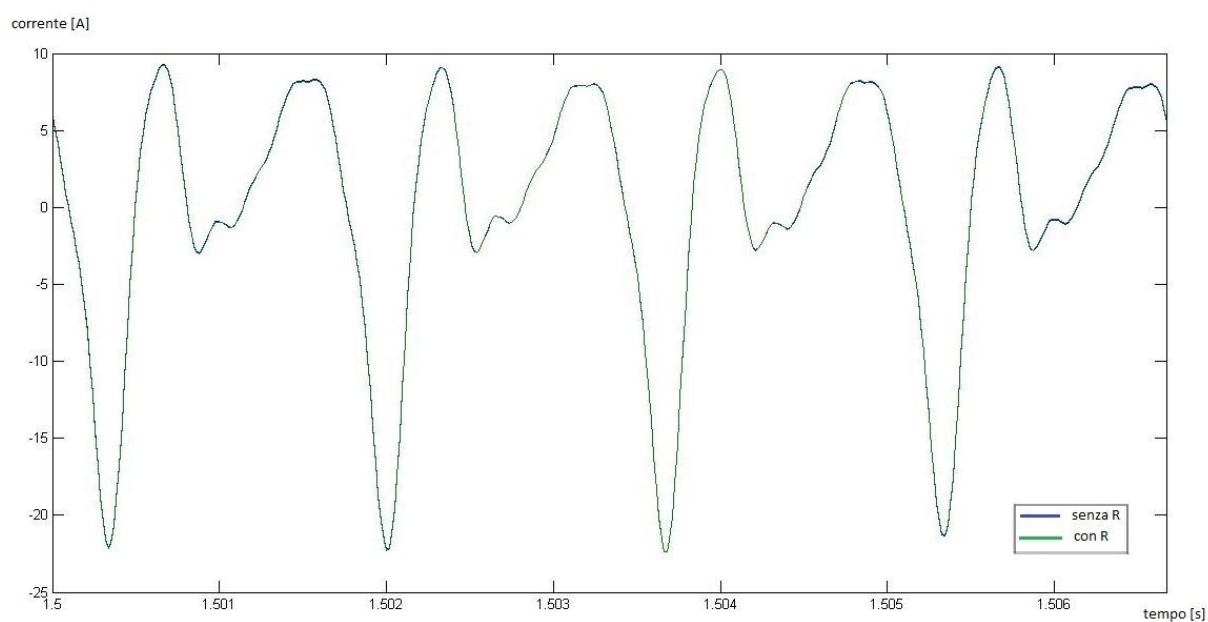


Grafico 12 - Andamento a regime della  $I_{conv\_r3sup}$ , caso raddrizzatore acceso e inverter spento: confronto fra le due modellizzazioni del reattore di spianamento

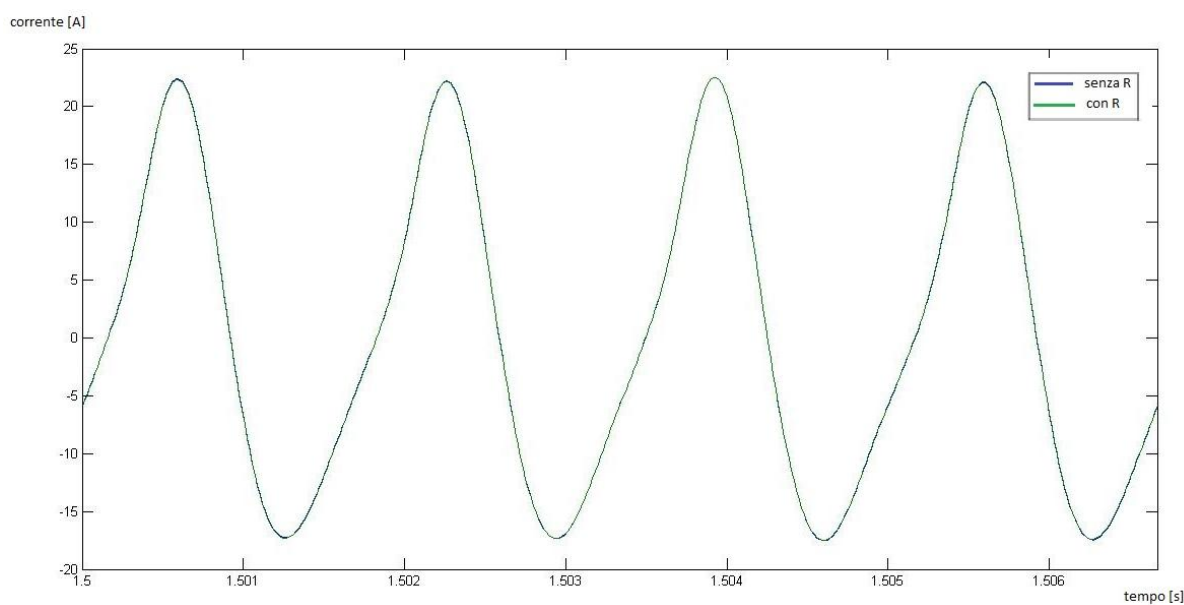


Grafico 13 - Andamento a regime della  $I_{conv\_i3sup}$ , caso raddrizzatore acceso e inverter spento: confronto fra le due modellizzazioni del reattore di spianamento

Nota: Con il simbolo 'Ls' si indicherà – qui e nel proseguo della tesi – l'induttanza del reattore di spianamento.

### 5.1.4 Condensatore di neutro

Nei moderni impianti HVDC è prevista l'installazione del condensatore di neutro. Scopo del condensatore è quello di fornire alle correnti armoniche generate dai convertitori una via di richiusura all'interno della stazione, senza che esse interessino i conduttori di polo generando quindi disturbi [13]. Per scegliere la taglia del condensatore<sup>45</sup> si è valutata l'influenza del condensatore stesso sul parametro  $I_{eq}$ , verificando come – all'aumentare della capacità installata ( $C_n$ ) – migliorasse l'azione di drenaggio delle armoniche e quindi diminuisse la corrente perturbata equivalente. Questo si evince chiaramente dai grafici seguenti – che si riferiscono ai due casi bipolare e monopolare e a ciascuno dei valori del reattore di spianamento - che riportano il massimo valore di  $I_{eq}$  misurata nelle dieci sezioni in funzione di  $C_n$  e della potenza trasmessa. Non essendo pensabile aumentare troppo il valore di capacità (per motivi economici e di aumento di energia immagazzinata), si è scelto di utilizzare il valore di 20  $\mu\text{F}$  indicato in [13].

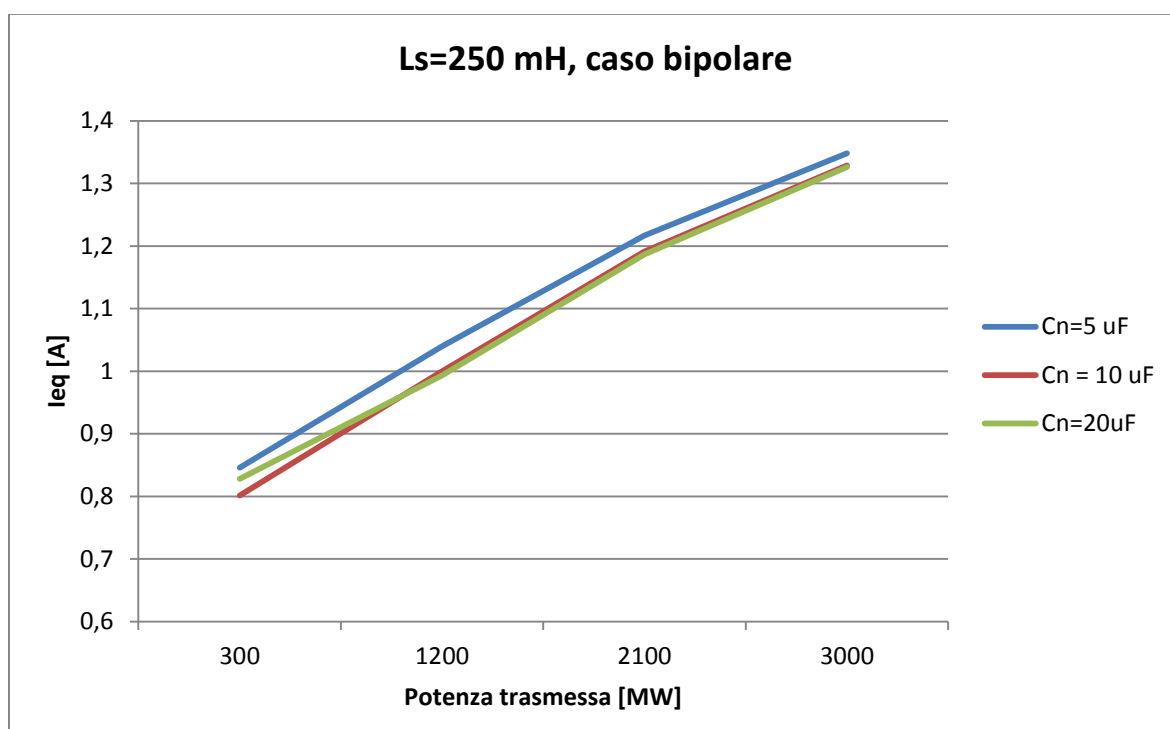


Grafico 14 - Valori massimi di  $I_{eq}$  misurati in funzione di  $C_n$  e  $P$ ,  $L_s=250$  mH – Caso bipolare

<sup>45</sup> Essa generalmente si aggira attorno a qualche decina di  $\mu\text{F}$  [12,20].

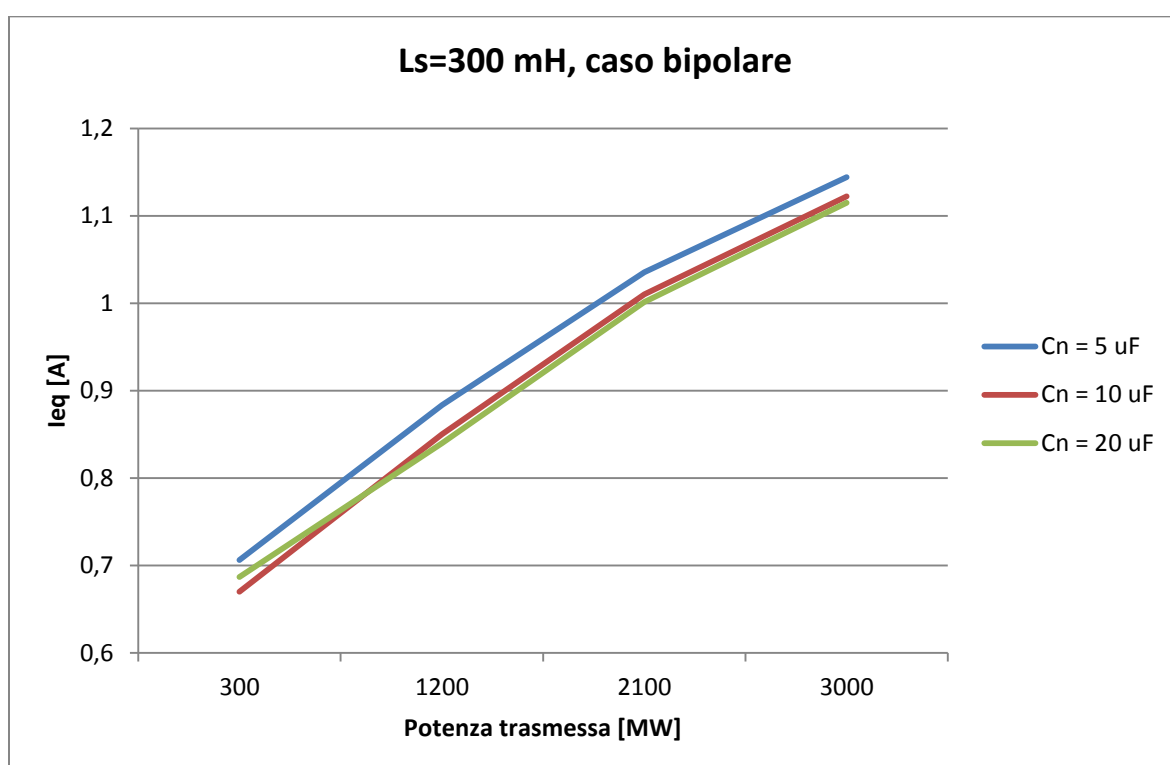


Grafico 15 - Valori massimi di  $I_{eq}$  misurati in funzione di  $C_n$  e  $P$ ,  $L_s=300$  mH – Caso bipolare

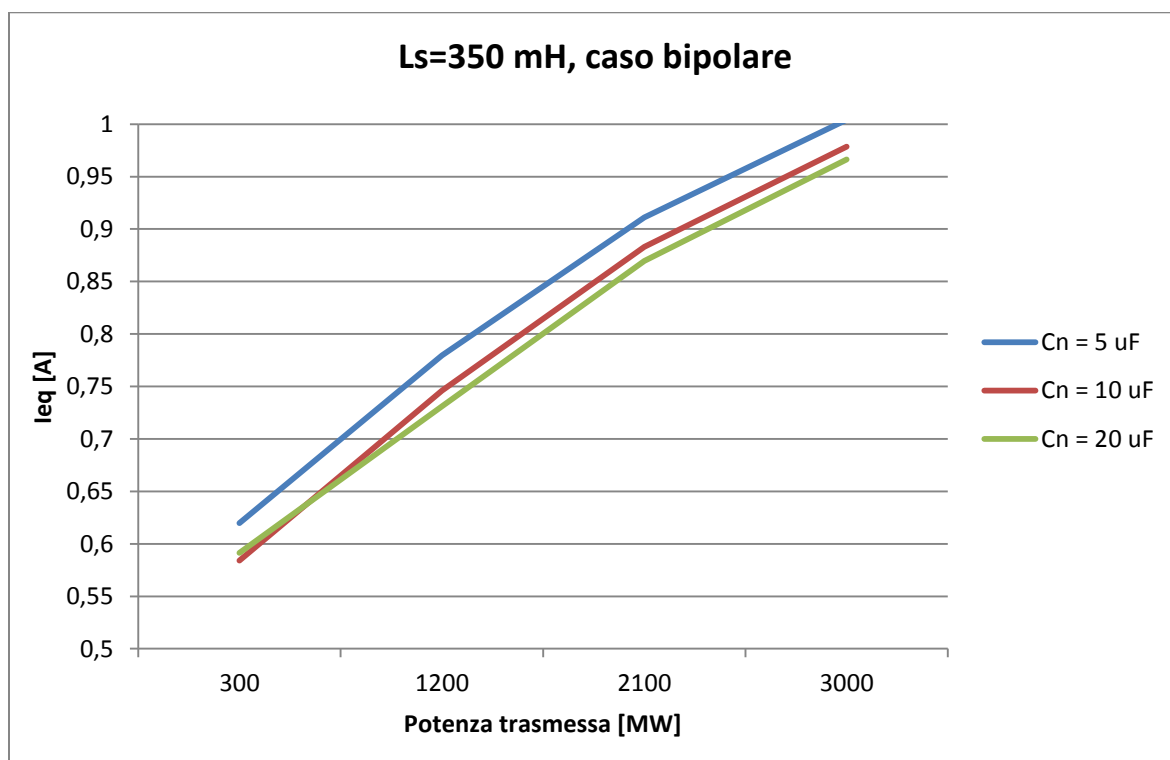


Grafico 16 - Valori massimi di  $I_{eq}$  misurati in funzione di  $C_n$  e  $P$ ,  $L_s=350$  mH - Caso bipolare

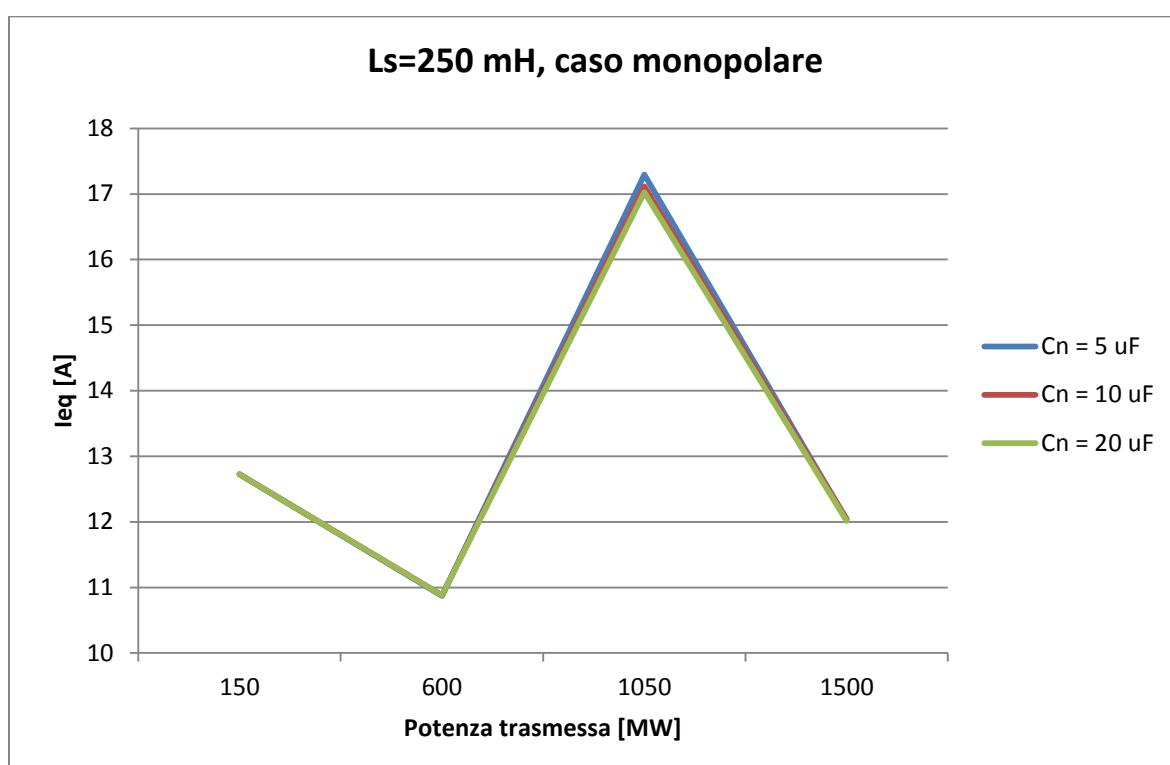


Grafico 17 - Valori massimi di Ieq misurati in funzione di Cn e P, Ls=250 mH - Caso monopolare

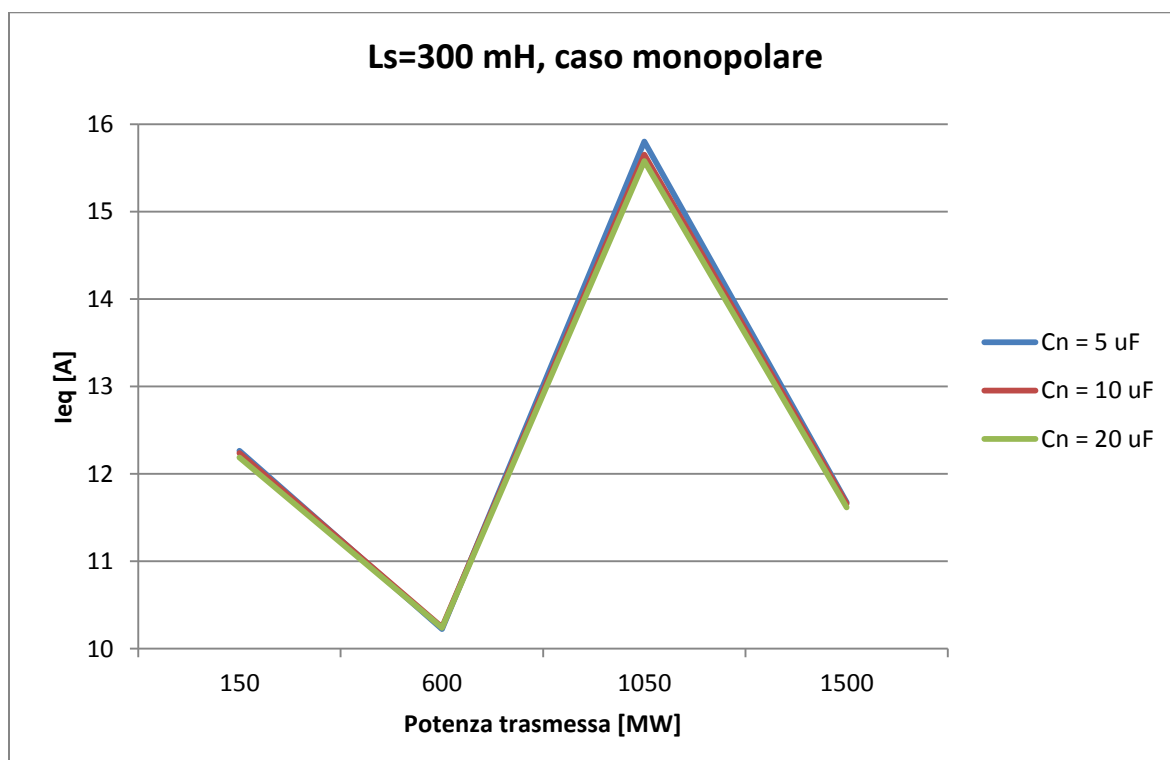


Grafico 18 - Valori massimi di Ieq misurati in funzione di Cn P, Ls = 300 mH - Caso monopolare



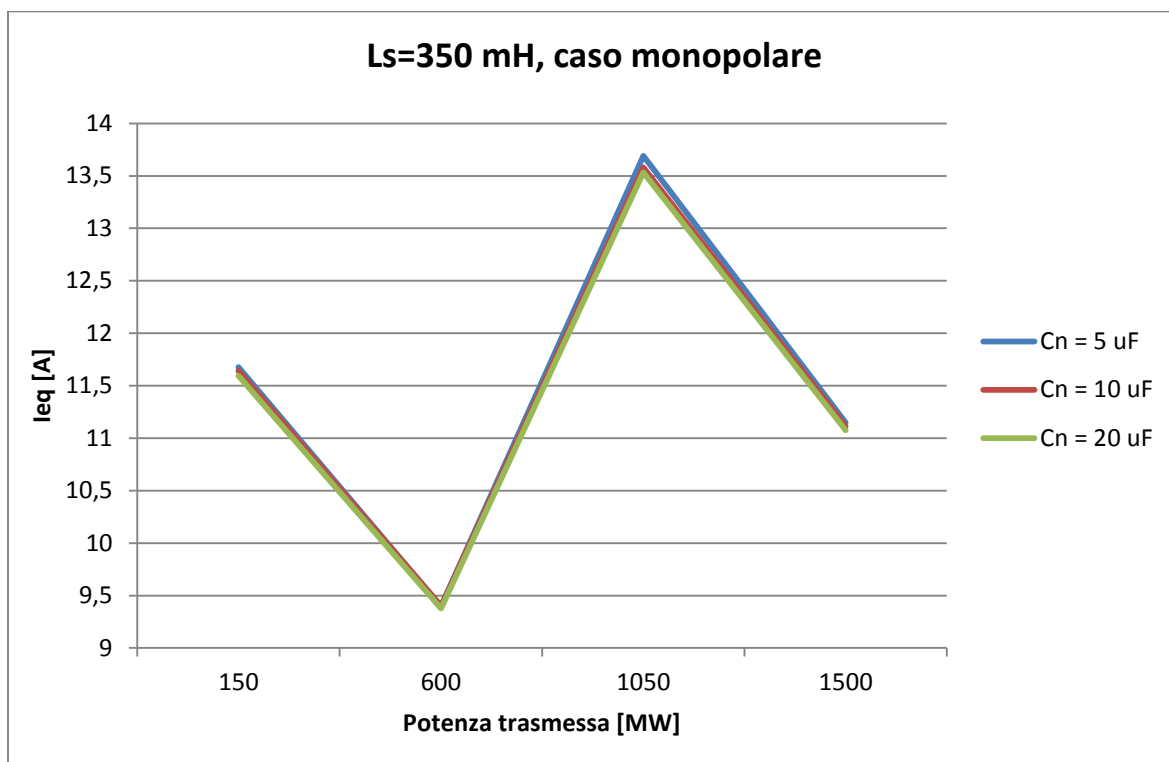


Grafico 19 - Valori massimi di  $I_{eq}$  misurati in funzione di  $C_n$  e  $P$ ,  $L_s = 300$  mH - Caso monopolare

L'utilità dell'installazione del condensatore di neutro per quanto riguarda la riduzione delle armoniche di corrente generate dal ponte lato DC – fatto ormai noto ed assodato [13] - è stata confermata valutando l'andamento dei valori massimi di corrente perturbata equivalente calcolati senza di esso, nelle due configurazioni monopolare e bipolare, in funzione del valore dell'induttanza  $L_s$  del reattore di spianamento. Confrontando i grafici 20 e 21 con quelli riportati nelle pagine precedenti, si nota come la corrente perturbata equivalente sia minore nel caso con condensatore di neutro installato.

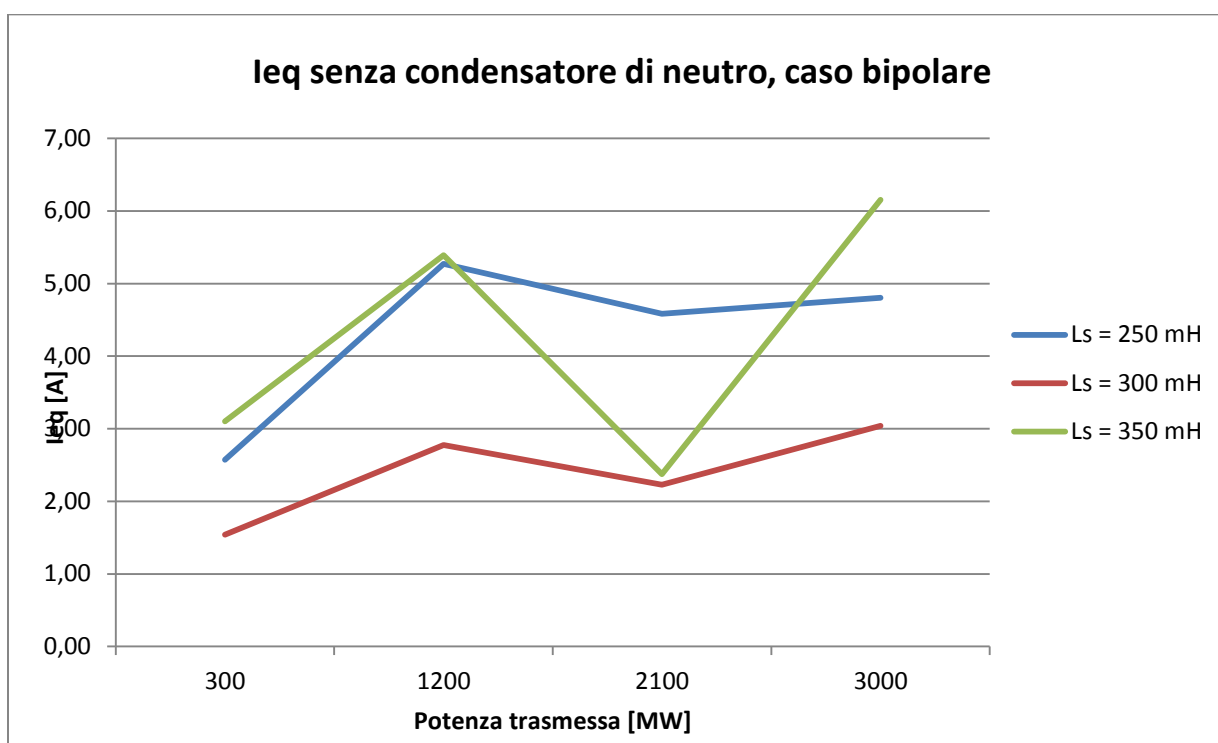


Grafico 20 - Corrente perturbata equivalente in funzione di Ls e P, senza condensatore di neutro - Caso bipolare

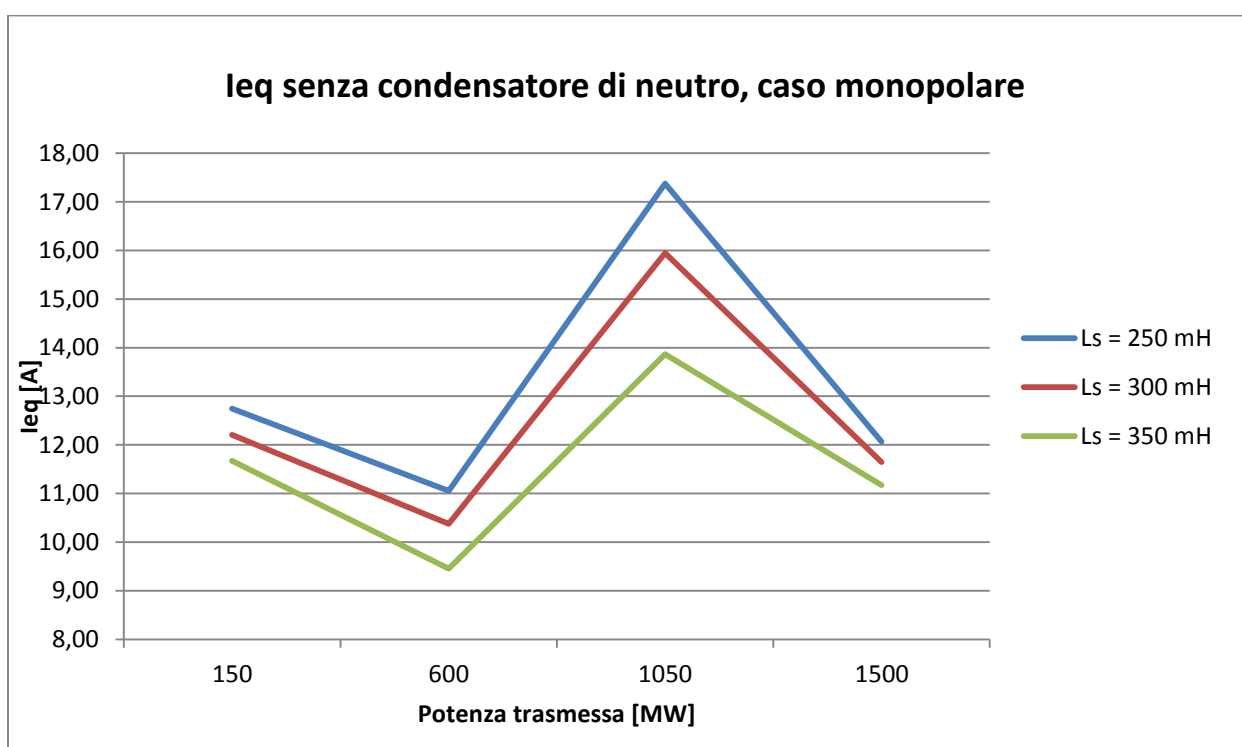


Grafico 21 - Corrente perturbata equivalente in funzione di Ls e P, senza condensatore di neutro - Caso monopolare

---

## 5.2 Scopo della simulazione

Come già detto, scopo della simulazione è quella di verificare le prestazioni (in termine di corrente perturbata equivalente) di una serie di filtri installati all'interno dell'impianto oggetto di studio, modellizzato secondo quanto descritto al capitolo 4.

### 5.2.1 Valori limite di $I_{eq}$ accettabili per l'impianto oggetto di studio

La prima cosa da fare è stabilire quale sia il valore di corrente perturbata equivalente limite accettabile. Riprendendo gli studi fatti al paragrafo 3.3.3.1, il valore da utilizzare - per quanto riguarda il funzionamento bipolare, calcolato nel caso di resistività del terreno  $1000 \Omega\text{m}^{46}$ , parametri  $K_{feq} = 0.32$  e  $B_{feq} = 1/750$ , lunghezza massima del tratto esposto pari a 8 km e distanza massima per cui vi siano interferenze pari a 10 km - sarebbe di 0.4670 A (arrotondato per comodità a 0.5 A).

Per quanto riguarda il funzionamento monopolare, invece - mancando un metodo per la definizione del limite, ma notato come generalmente esso sia pari al doppio rispetto a quello utilizzato nel caso bipolare (si veda ad es. la Tabella 5) [10] - sarebbe sensato scegliere un valore di  $1\text{A}^{47}$ .

La bontà di queste scelte è suffragata, ad esempio, dal confronto con l'impianto cinese "Gui - Guang", anch'esso avente una potenza nominata di 3000 MW, in cui i limiti sono i seguenti [10]:

- 500 mA nel funzionamento bipolare
- 1000 mA nel funzionamento monopolare

---

<sup>46</sup> Questo valore di resistività del terreno è quello considerato più "comune" dal già citato Standard IEEE [6].

<sup>47</sup> Il limite per quanto riguarda il funzionamento monopolare può essere assunto più alto rispetto al caso bipolare in quanto esso è una condizione di emergenza nella quale l'impianto si trova a lavorare per periodi di tempo limitati.

Nota: essendo il calcolo della  $I_{eq}$  condotto in corrispondenza di dieci sezioni di misura differenti, si chiarisce che come valore di  $I_{eq}$  si intenderà da qui in poi salvo diverse indicazioni il massimo dei dieci valori elaborati, a qualunque posizione esso faccia riferimento.

Come già più volte ripetuto, però, il valore di  $I_{eq\_lim}$  è fortemente correlato alle specificità dell'impianto: per far sì che lo studio che si sta compiendo possa avere un carattere più generale e quindi adattarsi anche ad impianti differenti - aventi valori di corrente perturbata equivalente limite maggiori - , si è scelto di raggruppare i risultati ottenuti in più fasce, a seconda del rispetto di requisiti di prestazione differenti rispetto a quelli stringenti sopra indicati. In particolare, si sono raggruppati i filtri in quattro insiemi in base al valore di  $I_{eq}$ ; questi gruppi sono ad "accettabilità decrescente", nel senso che passando dalla fascia 1 alle successive i requisiti di prestazione rispettati sono meno rigidi; le fasce considerate sono riportate nelle tabelle seguenti – distinte nei casi di funzionamento bipolare e monopolare.

	Range $I_{eq}$
Fascia 1	0 - 500 mA
Fascia 2	0,5 - 1 A
Fascia 3	1 - 1,5 A
Fascia 4	> 1,5 A

Tabella 21 - Definizione delle fasce in cui dividere i filtri, caso bipolare

	Range $I_{eq}$
Fascia 1	0 - 1000 mA
Fascia 2	1 - 2 A
Fascia 3	2 - 3 A
Fascia 4	> 3 A

Tabella 22 - Definizione delle fasce in cui dividere i filtri, caso monopolare

Le prestazioni dei filtri non solo vanno valutate nelle due diverse modalità di funzionamento dell'impianto, ma anche con valori della potenza trasmessa diversi dalla nominale, in particolare con potenze decrescenti fino al 10% del valore di targa. Si è scelto di considerare quattro livelli di potenza per ciascuna configurazione dell'impianto

(rispettivamente, 300 MW, 1200 MW, 2100 MW, 3000 MW nel caso bipolare e 150 MW, 600 MW, 1050 MW e 1500 MW per quello monopolare).

### 5.2.2 Verifica della necessità dei filtri

Una volta stabiliti i requisiti armonici si è verificato che essi non risultano soddisfatti nel caso non vengano installati filtri nell'impianto. Analizzando i grafici riportati nel paragrafo 5.1.4 (e qui sintetizzati in forma tabellare) si nota come, anche con il condensatore di neutro inserito, i valori di corrente perturbata equivalente non soddisfano i limiti (si ricorda che occorre soddisfare i limiti per ciascun valore di potenza e per ciascuna delle configurazioni dell'impianto).

Condensatore di neutro		Ls [mH]	FUNZIONAMENTO BIPOLARE			
20 $\mu$ F	Non installato		P=300 MW	P=1200 MW	P=2100 MW	P=3000 MW
			Ieq max [A]	Ieq max [A]	Ieq max [A]	Ieq max [A]
	X	250	2,57	5,27	4,59	4,80
	X	300	1,54	2,78	2,23	3,04
	X	350	3,10	5,39	2,38	6,15
X		250	0,83	0,99	1,19	1,33
X		300	0,69	0,84	1,00	1,11
X		350	0,59	0,73	0,87	0,97

Tabella 23 - Valori di  $I_{eq}$  misurati senza filtri, in funzione del valore del reattore di spianamento, con e senza condensatore di neutro - Caso bipolare

Condensatore di neutro		Ls [mH]	FUNZIONAMENTO MONOPOLARE			
20 $\mu$ F	Non installato		P=150 MW	P=600 MW	P=1050 MW	P=1500 MW
			Ieq max [A]	Ieq max [A]	Ieq max [A]	Ieq max [A]
	X	250	12,75	11,06	17,37	12,06
	X	300	12,20	10,38	15,95	11,65
	X	350	11,67	9,45	13,87	11,17
X		250	12,73	10,88	17,03	12,01
X		300	12,19	10,24	15,58	11,62
X		350	11,60	9,38	13,53	11,08

Tabella 24 - Valori di  $I_{eq}$  misurati senza filtri, in funzione del valore del reattore di spianamento, con e senza condensatore di neutro - Caso monopolare

Risulta chiaro come sia necessario installare nell'impianto oggetto di studio un opportuno sistema di filtraggio.

### 5.2.2.1 Valutazione delle armoniche causa di disturbo

Per conoscere quali siano le armoniche che maggiormente contribuiscono alla corrente perturbata equivalente, si è analizzato il valore efficace (pesato con il C-message factor) – per ciascuna condizione di funzionamento, per ciascun valore del reattore di spianamento, per ciascuno dei quattro valori sopra indicati di potenza trasmessa e ovviamente in ciascuna sezione di misura – di ognuna delle 28 armoniche di corrente. Effettuando la media dei valori ottenuti nelle 24 situazioni complessivamente analizzate e nelle dieci sezioni di misura si è potuto vedere come le armoniche che più contribuiscono alla corrente perturbata equivalente e quindi allo mancato rispetto dei requisiti armonici sono le caratteristiche di ordine più basso, in particolare la 24° e la 12° e – in misura minore – la 36° e la 48°.

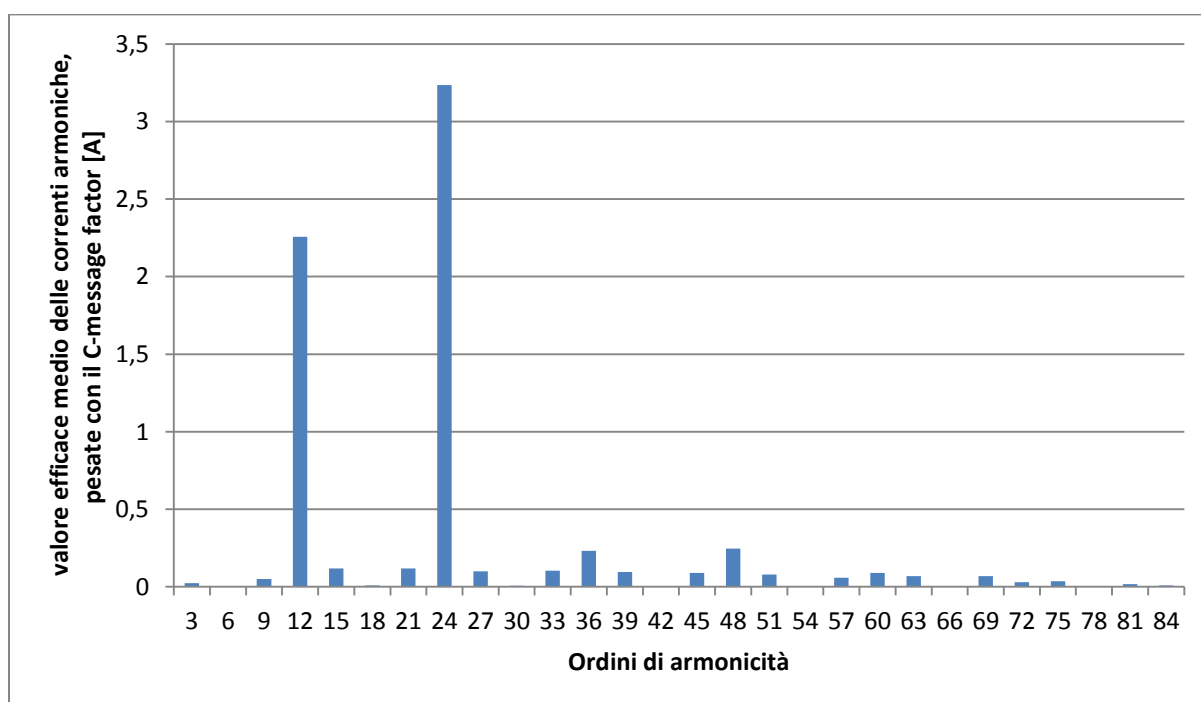


Grafico 22 - Verifica delle armoniche che maggiormente causano disturbi

In base a questo studio si è potuto conoscere quali armoniche è più utile filtrare e quindi scegliere le frequenza di risonanza dei filtri da valutare.

La scelta di tipologia e parametri dei filtri lato DC adatti al rispetto dei vincoli imposti occuperà la prossima parte della trattazione.

## 5.3 Verifica delle prestazioni dei filtri: filtri ad accordo singolo

Il primo passo è stato quello di verificare se fosse possibile raggiungere i requisiti richiesti utilizzando la tipologia più semplice possibile di filtraggio, consistente nell'installazione di un solo filtro ad accordo singolo<sup>48</sup>.

La struttura di un filtro ad accordo singolo è quella già illustrata in Figura 7 e qui riportata per comodità<sup>49</sup>.

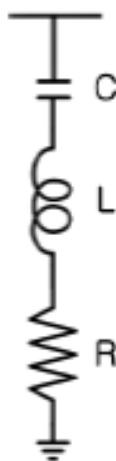


Figura 21 - Filtro ad accordo singolo

I parametri caratteristici di un filtro ad accordo singolo sono i seguenti:

- Capacità del condensatore;
- Frequenza di accordo del filtro;
- Fattore di qualità<sup>50</sup>.

---

<sup>48</sup> Si intende – ovviamente – un filtro per polo e per stazione, quindi quattro filtri uguali complessivamente.

<sup>49</sup> In questo caso si è scelto di rappresentare esplicitamente la resistenza R in quanto sarà uno dei parametri da valutare: si noti come essa non sia un elemento aggiunto appositamente al filtro (come ad esempio nei filtri smorzati di primo e secondo ordine) ma sia costituita principalmente dalla resistenza parassita dell'induttore, e per questo motivo spesso la si omette.

Da essi si possono ottenere facilmente le tre grandezze circuitali C,L,R:

- La capacità C è pari al valore della capacità del condensatore;
- L'induttanza L è nota dalla frequenza di accordo; detta  $f_n$  la frequenza di risonanza, si ha che

$$L = \left( \frac{1}{2\pi f_n \sqrt{C}} \right)^2 \quad (5.1)$$

- La resistenza R si ottiene dal fattore di qualità del filtro e dalla frequenza di risonanza mediante la formula seguente:

$$R = \frac{2\pi f_n L}{QF} \quad (5.2)$$

dove QF è il fattore di qualità del filtro alla frequenza di accordo.

Durante la simulazione i tre parametri caratteristici sono stati fatti variare indipendentemente l'uno rispetto all'altro all'interno degli intervalli seguenti:

- La capacità C, cui sono stati fatti assumere i valori [0.5 $\mu$ F; 1  $\mu$ F; 2  $\mu$ F; 3 $\mu$ F] . Questi valori di capacità sono valori tipici per filtri ad accordo singolo in impianti HVDC [21,22].
- La frequenza di accordo, concentrandosi attorno alle armoniche risultate più "disturbanti" (si veda a tal proposito il Grafico 22): si sono quindi provati filtri accordati alle armoniche seguenti: 12; 24; 36; 48.
- Il fattore di qualità, a cui sono stati fatti assumere i valori [40, 60, 75, 90] <sup>51</sup>.

<sup>50</sup> Il fattore di qualità di un filtro è collegato alle non idealità (quindi alle perdite ohmiche) del filtro stesso.

<sup>51</sup> L'intervallo 40/90 per il fattore di qualità dei filtri ad accordo singolo di un impianto HVDC è stato desunto dal documento "Reactive Power Compensation and Harmonic Filters for HVDC Classic", ABB Group. [http://www.sari-energy.org/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Workshop\\_Sep\\_2011/presentations/Reactive%20Power%20and%20Harmonic%20Filter\\_ABB.pdf](http://www.sari-energy.org/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Workshop_Sep_2011/presentations/Reactive%20Power%20and%20Harmonic%20Filter_ABB.pdf)



---

Considerando il fatto che anche l'induttanza del reattore di spianamento  $L_s$  è un parametro variabile, complessivamente si sono valutate le prestazioni di 192 filtri.

### 5.3.1 Filtri ad accordo singolo: risultati

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati delle simulazioni effettuate: i filtri sono stati suddivisi a seconda delle fasce di prestazione da loro soddisfatte, e ordinati secondo la massima corrente perturbata equivalente misurata nel funzionamento monopolare. Le tabelle mostrano, per ciascun filtro<sup>52</sup> e per ciascuna condizione di funzionamento, la massima corrente perturbata equivalente misurata nelle dieci sezioni più volte descritte. Risultati più completi, contenenti la potenza persa nei filtri e i valori efficaci delle correnti misurate (vedi paragrafo 4.3) non sono stati qui riportati per non appesantire troppo l'esposizione.

---

<sup>52</sup> Si intende qui come "filtro" la combinazione del filtro ad accordo singolo e del reattore di spianamento.

Ls [mH]	C [µF]	L [mH]	Ord_ris	QF	FUNZIONAMENTO BIPOLARE					FUNZIONAMENTO MONOPOLARE				
					P=300 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1200 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=2100 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=3000 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=150 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=600 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1050 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1500 MW I <sub>eq</sub> [A]		
350	3	23,45	12	40	0,234	0,429	0,484	0,535	0,479	0,546	0,836	0,607		
350	3	23,45	12	60	0,234	0,430	0,485	0,536	0,476	0,545	0,837	0,605		
350	3	23,45	12	75	0,234	0,431	0,486	0,537	0,475	0,544	0,837	0,604		
350	3	23,45	12	90	0,234	0,431	0,486	0,537	0,474	0,544	0,837	0,604		
350	2	35,18	12	90	0,296	0,573	0,696	0,740	0,534	0,625	0,944	0,718		
350	2	35,18	12	75	0,296	0,573	0,695	0,739	0,535	0,626	0,944	0,718		
350	2	35,18	12	60	0,296	0,572	0,694	0,738	0,537	0,626	0,944	0,718		
350	2	35,18	12	40	0,295	0,570	0,691	0,736	0,543	0,628	0,944	0,719		
300	3	23,45	12	40	0,251	0,489	0,549	0,605	0,548	0,625	0,960	0,696		
300	3	23,45	12	60	0,251	0,490	0,551	0,607	0,545	0,624	0,960	0,693		
300	3	23,45	12	75	0,251	0,490	0,551	0,608	0,544	0,623	0,960	0,693		
300	3	23,45	12	90	0,251	0,491	0,551	0,608	0,543	0,623	0,960	0,692		
300	2	35,18	12	90	0,328	0,656	0,795	0,845	0,611	0,715	1,083	0,815		
300	2	35,18	12	75	0,328	0,655	0,794	0,844	0,612	0,715	1,083	0,815		
300	2	35,18	12	60	0,327	0,654	0,793	0,843	0,615	0,716	1,083	0,816		
300	2	35,18	12	40	0,326	0,652	0,789	0,840	0,622	0,719	1,083	0,817		
250	3	23,45	12	40	0,276	0,568	0,637	0,699	0,641	0,730	1,125	0,815		
250	3	23,45	12	60	0,276	0,570	0,638	0,701	0,637	0,729	1,125	0,812		
250	3	23,45	12	75	0,276	0,570	0,638	0,701	0,636	0,728	1,125	0,811		
250	3	23,45	12	90	0,276	0,571	0,639	0,702	0,635	0,728	1,125	0,810		
250	2	35,18	12	90	0,375	0,768	0,929	0,989	0,714	0,834	1,268	0,945		
250	2	35,18	12	75	0,375	0,767	0,928	0,988	0,715	0,834	1,268	0,945		
250	2	35,18	12	60	0,374	0,766	0,927	0,986	0,718	0,835	1,268	0,945		
250	2	35,18	12	40	0,373	0,763	0,923	0,983	0,726	0,838	1,268	0,946		
350	1	17,59	24	40	0,395	0,389	0,387	0,428	1,448	1,000	0,710	1,451		
350	1	17,59	24	60	0,398	0,392	0,389	0,429	1,448	1,000	0,709	1,451		
350	1	17,59	24	75	0,399	0,393	0,389	0,430	1,449	1,000	0,709	1,451		
350	1	17,59	24	90	0,400	0,394	0,390	0,430	1,449	1,000	0,708	1,452		
300	1	17,59	24	40	0,438	0,438	0,426	0,466	1,655	1,144	0,812	1,662		
300	1	17,59	24	60	0,442	0,441	0,428	0,468	1,656	1,145	0,811	1,662		

300	1	17,59	24	75	0,443	0,443	0,429	0,468	1,656	1,145	0,811	1,663
300	1	17,59	24	90	0,444	0,444	0,429	0,469	1,656	1,145	0,811	1,663
350	1	70,36	12	40	0,434	0,709	0,708	0,789	0,766	1,013	1,699	1,468
350	1	70,36	12	60	0,437	0,713	0,711	0,792	0,762	1,013	1,702	1,469
350	1	70,36	12	75	0,438	0,714	0,712	0,793	0,761	1,013	1,703	1,470
350	1	70,36	12	90	0,439	0,715	0,713	0,794	0,761	1,013	1,703	1,470
350	2	8,80	24	40	0,237	0,191	0,230	0,274	1,726	1,172	0,809	1,705
350	2	8,80	24	60	0,237	0,191	0,230	0,274	1,729	1,174	0,810	1,707
350	2	8,80	24	75	0,237	0,191	0,230	0,274	1,730	1,174	0,811	1,708
350	2	8,80	24	90	0,237	0,191	0,230	0,275	1,731	1,175	0,811	1,709
350	2	3,91	36	40	0,257	0,197	0,247	0,294	1,794	1,318	1,495	1,742
350	2	3,91	36	60	0,257	0,197	0,247	0,294	1,798	1,322	1,506	1,746
350	2	3,91	36	75	0,257	0,197	0,247	0,294	1,799	1,324	1,511	1,747
350	2	3,91	36	90	0,257	0,197	0,247	0,294	1,801	1,326	1,514	1,748
300	1	70,36	12	40	0,490	0,815	0,812	0,908	0,863	1,145	1,907	1,638
300	1	70,36	12	60	0,493	0,819	0,815	0,912	0,859	1,145	1,909	1,638
300	1	70,36	12	75	0,495	0,820	0,816	0,914	0,858	1,145	1,910	1,639
300	1	70,36	12	90	0,495	0,821	0,817	0,915	0,857	1,146	1,911	1,639
250	1	17,59	24	40	0,497	0,503	0,478	0,518	1,930	1,337	0,949	1,943
250	1	17,59	24	60	0,503	0,508	0,481	0,521	1,930	1,337	0,947	1,944
250	1	17,59	24	75	0,505	0,510	0,483	0,522	1,931	1,337	0,947	1,945
250	1	17,59	24	90	0,507	0,511	0,483	0,522	1,931	1,337	0,947	1,945
350	3	2,61	36	40	0,230	0,179	0,231	0,275	1,968	1,358	1,144	1,925
300	2	8,80	24	40	0,245	0,203	0,240	0,285	1,970	1,339	0,925	1,951
350	3	2,61	36	60	0,230	0,179	0,231	0,275	1,971	1,360	1,147	1,928
350	3	2,61	36	75	0,230	0,179	0,231	0,275	1,972	1,361	1,148	1,929
350	3	2,61	36	90	0,230	0,179	0,231	0,275	1,973	1,361	1,149	1,930
300	2	8,80	24	60	0,245	0,203	0,240	0,285	1,974	1,341	0,926	1,954
300	2	8,80	24	75	0,245	0,203	0,240	0,286	1,975	1,342	0,927	1,955
300	2	8,80	24	90	0,245	0,204	0,240	0,286	1,976	1,343	0,927	1,956
350	3	1,47	48	40	0,235	0,186	0,239	0,284	1,984	1,413	1,415	1,935
350	3	1,47	48	60	0,235	0,186	0,239	0,284	1,986	1,415	1,420	1,938
350	3	1,47	48	75	0,235	0,186	0,239	0,284	1,987	1,416	1,422	1,939

350	3	1,47	48	90	0,235	0,186	0,239	0,284	1,988	1,417	1,423	1,939
-----	---	------	----	----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabella 25 - Filtri ad accordo singolo: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 2

Ls [mH]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	Ord.iris	QF	FUNZIONAMENTO BIPOLARE					FUNZIONAMENTO MONOPOLARE				
					P=300 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1200 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=2100 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=3000 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=150 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=600 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1050 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1500 MW I <sub>eq</sub> [A]		
300	2	3,91	36	40	0,267	0,205	0,254	0,302	2,048	1,507	1,711	1,994		
300	2	3,91	36	60	0,267	0,205	0,254	0,303	2,053	1,512	1,724	1,998		
300	2	3,91	36	75	0,267	0,205	0,254	0,303	2,055	1,514	1,729	2,000		
300	2	3,91	36	90	0,267	0,206	0,255	0,303	2,056	1,516	1,732	2,001		
350	1	4,40	48	40	0,477	0,386	0,388	0,438	1,816	1,478	2,082	1,756		
350	2	2,20	48	40	0,265	0,208	0,260	0,307	1,964	1,545	2,086	1,893		
350	1	4,40	48	60	0,479	0,388	0,389	0,439	1,820	1,483	2,091	1,760		
350	1	4,40	48	75	0,480	0,389	0,389	0,439	1,822	1,485	2,095	1,761		
350	1	4,40	48	90	0,481	0,389	0,390	0,440	1,823	1,486	2,098	1,762		
350	2	2,20	48	60	0,265	0,208	0,260	0,307	1,971	1,553	2,103	1,899		
350	3	5,86	24	40	0,217	0,166	0,212	0,256	2,106	1,422	0,972	2,072		
350	2	2,20	48	75	0,265	0,208	0,260	0,307	1,973	1,556	2,110	1,902		
350	3	5,86	24	60	0,217	0,166	0,212	0,256	2,113	1,427	0,976	2,080		
350	2	2,20	48	90	0,265	0,208	0,260	0,307	1,975	1,559	2,115	1,904		
350	3	5,86	24	75	0,217	0,166	0,212	0,256	2,116	1,429	0,977	2,083		
350	3	5,86	24	90	0,217	0,166	0,212	0,256	2,118	1,431	0,978	2,085		
250	1	70,36	12	40	0,561	0,953	0,951	1,074	0,989	1,317	2,171	1,852		
250	1	70,36	12	60	0,564	0,957	0,954	1,079	0,984	1,317	2,174	1,852		
250	1	70,36	12	75	0,565	0,959	0,955	1,081	0,983	1,317	2,175	1,852		
250	1	70,36	12	90	0,566	0,960	0,956	1,082	0,982	1,317	2,175	1,852		
300	3	2,61	36	40	0,235	0,182	0,234	0,279	2,244	1,550	1,306	2,201		
300	3	2,61	36	60	0,235	0,182	0,234	0,279	2,248	1,553	1,309	2,205		

300	3	2,61	36	75	0,235	0,182	0,234	0,279	2,249	1,554	1,310	2,206
300	3	2,61	36	90	0,235	0,182	0,234	0,279	2,250	1,554	1,311	2,207
300	3	1,47	48	40	0,241	0,191	0,244	0,289	2,264	1,614	1,618	2,213
300	3	1,47	48	60	0,241	0,191	0,244	0,289	2,266	1,617	1,623	2,216
300	3	1,47	48	75	0,241	0,191	0,244	0,289	2,268	1,618	1,625	2,217
300	3	1,47	48	90	0,241	0,191	0,244	0,289	2,268	1,618	1,626	2,218
250	2	8,80	24	40	0,264	0,234	0,268	0,314	2,294	1,561	1,079	2,278
250	2	8,80	24	60	0,264	0,235	0,269	0,315	2,297	1,564	1,080	2,281
250	2	8,80	24	75	0,264	0,235	0,269	0,315	2,299	1,565	1,081	2,283
250	2	8,80	24	90	0,265	0,235	0,269	0,315	2,300	1,565	1,081	2,284
350	1	7,82	36	40	0,455	0,368	0,363	0,409	1,910	1,575	2,309	1,830
350	0,5	35,18	24	40	0,439	0,471	0,602	0,724	2,336	1,617	1,142	2,333
350	0,5	35,18	24	60	0,441	0,474	0,606	0,729	2,337	1,617	1,141	2,334
350	0,5	35,18	24	75	0,442	0,475	0,607	0,731	2,337	1,618	1,141	2,335
350	0,5	35,18	24	90	0,443	0,475	0,608	0,733	2,337	1,618	1,141	2,335
350	1	7,82	36	60	0,457	0,370	0,364	0,410	1,924	1,591	2,343	1,843
350	1	7,82	36	75	0,458	0,371	0,365	0,410	1,930	1,597	2,357	1,848
350	1	7,82	36	90	0,459	0,372	0,365	0,411	1,934	1,602	2,366	1,852
300	1	4,40	48	40	0,515	0,413	0,409	0,461	2,075	1,690	2,380	2,011
250	2	3,91	36	40	0,289	0,230	0,278	0,327	2,386	1,759	2,000	2,330
300	2	2,20	48	40	0,277	0,217	0,269	0,317	2,244	1,769	2,390	2,168
300	1	4,40	48	60	0,518	0,416	0,410	0,462	2,080	1,695	2,391	2,015
250	2	3,91	36	60	0,290	0,230	0,278	0,327	2,391	1,765	2,015	2,335
250	2	3,91	36	75	0,290	0,230	0,278	0,328	2,394	1,767	2,022	2,337
250	2	3,91	36	90	0,290	0,230	0,278	0,328	2,395	1,769	2,026	2,338
300	1	4,40	48	75	0,519	0,417	0,411	0,462	2,082	1,698	2,396	2,017
300	1	4,40	48	90	0,520	0,417	0,411	0,463	2,083	1,699	2,398	2,018
300	3	5,86	24	40	0,221	0,170	0,214	0,258	2,401	1,624	1,111	2,369
300	3	5,86	24	60	0,221	0,170	0,214	0,259	2,410	1,630	1,114	2,378
300	2	2,20	48	60	0,277	0,217	0,269	0,317	2,252	1,778	2,411	2,175
300	3	5,86	24	75	0,221	0,170	0,214	0,259	2,413	1,632	1,116	2,381
300	3	5,86	24	90	0,221	0,170	0,214	0,259	2,416	1,633	1,117	2,383
300	2	2,20	48	75	0,277	0,217	0,269	0,318	2,255	1,781	2,419	2,178



300	2	2,20	48	90	0,277	0,217	0,269	0,318	2,257	1,784	2,424	2,180
250	3	2,61	36	40	0,243	0,187	0,240	0,286	2,611	1,806	1,521	2,569
250	3	2,61	36	60	0,243	0,187	0,240	0,286	2,615	1,809	1,525	2,573
250	3	2,61	36	75	0,243	0,187	0,240	0,286	2,616	1,810	1,527	2,574
250	3	2,61	36	90	0,243	0,187	0,240	0,286	2,617	1,811	1,528	2,575
250	3	1,47	48	40	0,250	0,197	0,251	0,297	2,634	1,881	1,889	2,584
250	3	1,47	48	60	0,250	0,197	0,251	0,297	2,637	1,884	1,895	2,587
250	3	1,47	48	75	0,250	0,197	0,251	0,297	2,639	1,886	1,897	2,588
250	3	1,47	48	90	0,250	0,197	0,251	0,297	2,640	1,887	1,899	2,589
300	1	7,82	36	40	0,497	0,400	0,385	0,429	2,183	1,801	2,642	2,096
300	1	7,82	36	60	0,500	0,404	0,386	0,430	2,199	1,819	2,681	2,111
300	1	7,82	36	75	0,502	0,405	0,387	0,431	2,206	1,827	2,697	2,117
300	1	7,82	36	90	0,503	0,406	0,388	0,431	2,210	1,832	2,707	2,121
350	0,5	140,72	12	40	0,625	0,661	0,883	0,802	1,384	1,606	2,768	2,345
350	0,5	140,72	12	60	0,637	0,667	0,894	0,808	1,379	1,606	2,771	2,346
350	0,5	140,72	12	75	0,642	0,669	0,898	0,811	1,377	1,606	2,773	2,347
350	0,5	140,72	12	90	0,645	0,671	0,901	0,813	1,376	1,606	2,774	2,348
250	1	4,40	48	40	0,545	0,428	0,427	0,492	2,420	1,972	2,778	2,351
250	1	4,40	48	60	0,548	0,430	0,429	0,493	2,425	1,978	2,790	2,356
250	3	5,86	24	40	0,227	0,177	0,220	0,264	2,793	1,891	1,294	2,765
300	0,5	35,18	24	40	0,475	0,531	0,677	0,815	2,789	1,930	1,356	2,794
250	1	4,40	48	75	0,549	0,431	0,429	0,494	2,427	1,981	2,796	2,358
300	0,5	35,18	24	60	0,478	0,534	0,681	0,821	2,790	1,930	1,356	2,796
300	0,5	35,18	24	75	0,479	0,536	0,683	0,823	2,790	1,931	1,356	2,796
300	0,5	35,18	24	90	0,480	0,536	0,684	0,825	2,791	1,931	1,356	2,797
250	1	4,40	48	90	0,549	0,432	0,430	0,494	2,428	1,982	2,799	2,360
250	2	2,20	48	40	0,301	0,242	0,294	0,344	2,616	2,067	2,800	2,536
250	3	5,86	24	60	0,227	0,177	0,220	0,265	2,802	1,898	1,299	2,774
250	3	5,86	24	75	0,227	0,177	0,220	0,265	2,806	1,900	1,300	2,778
250	3	5,86	24	90	0,227	0,177	0,220	0,265	2,809	1,902	1,301	2,781
250	2	2,20	48	60	0,301	0,243	0,294	0,344	2,625	2,078	2,824	2,545
250	2	2,20	48	75	0,301	0,243	0,294	0,344	2,629	2,082	2,833	2,548
250	2	2,20	48	90	0,301	0,243	0,294	0,344	2,632	2,085	2,840	2,550

350	0,5	15,64	36	40	0,688	0,353	0,555	0,899	2,892	2,004	1,754	2,838
350	0,5	15,64	36	60	0,694	0,356	0,560	0,908	2,893	2,005	1,761	2,840
350	0,5	15,64	36	75	0,697	0,357	0,562	0,912	2,893	2,006	1,763	2,840
350	0,5	15,64	36	90	0,698	0,357	0,563	0,914	2,894	2,006	1,765	2,841

Tabella 26 - Filtri ad accordo singolo: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 3

Ls [mH]	C [µF]	L [mH]	Ord. ris	QF	FUNZIONAMENTO BIPOLARE						FUNZIONAMENTO MONOPOLARE					
					P=300 MW I <sub>leg</sub> [A]	P=1200 MW I <sub>leg</sub> [A]	P=2100 MW I <sub>leg</sub> [A]	P=3000 MW I <sub>leg</sub> [A]	P=150 MW I <sub>leg</sub> [A]	P=600 MW I <sub>leg</sub> [A]	P=1050 MW I <sub>leg</sub> [A]	P=1500 MW I <sub>leg</sub> [A]				
350	0,5	8,80	48	40	0,816	0,389	0,646	1,070	3,085	2,184	1,691	3,083				
350	0,5	8,80	48	60	0,824	0,391	0,651	1,080	3,086	2,187	1,693	3,086				
250	1	7,82	36	40	0,536	0,427	0,405	0,457	2,546	2,103	3,087	2,452				
350	0,5	8,80	48	75	0,827	0,392	0,654	1,085	3,087	2,188	1,693	3,088				
350	0,5	8,80	48	90	0,829	0,393	0,655	1,088	3,087	2,189	1,694	3,089				
300	0,5	140,72	12	40	0,719	0,761	1,024	0,924	1,532	1,778	3,120	2,661				
300	0,5	140,72	12	60	0,733	0,768	1,037	0,932	1,526	1,777	3,124	2,663				
300	0,5	140,72	12	75	0,740	0,772	1,043	0,935	1,524	1,777	3,126	2,664				
300	0,5	140,72	12	90	0,744	0,774	1,046	0,937	1,523	1,777	3,127	2,664				
250	1	7,82	36	60	0,541	0,431	0,407	0,458	2,564	2,124	3,132	2,469				
250	1	7,82	36	75	0,542	0,432	0,408	0,459	2,572	2,133	3,151	2,476				
250	1	7,82	36	90	0,544	0,433	0,409	0,459	2,577	2,139	3,163	2,481				
250	0,5	35,18	24	40	0,536	0,616	0,782	0,941	3,463	2,396	1,675	3,487				
300	0,5	15,64	36	40	0,786	0,387	0,629	1,034	3,489	2,417	2,009	3,444				
250	0,5	35,18	24	60	0,540	0,620	0,787	0,948	3,464	2,397	1,675	3,490				
300	0,5	15,64	36	60	0,795	0,390	0,636	1,047	3,490	2,419	2,016	3,446				
250	0,5	35,18	24	75	0,541	0,621	0,789	0,951	3,465	2,397	1,675	3,491				
300	0,5	15,64	36	75	0,798	0,391	0,638	1,052	3,491	2,419	2,019	3,447				
300	0,5	15,64	36	90	0,801	0,392	0,640	1,055	3,491	2,420	2,021	3,447				

250	0,5	35,18	24	90	0,543	0,622	0,791	0,953	3,465	2,398	1,675	3,491
250	0,5	140,72	12	40	0,845	0,900	1,213	1,090	1,718	1,999	3,575	3,079
250	0,5	140,72	12	60	0,864	0,910	1,229	1,100	1,710	1,997	3,581	3,081
250	0,5	140,72	12	75	0,872	0,914	1,236	1,103	1,708	1,997	3,583	3,082
250	0,5	140,72	12	90	0,877	0,917	1,240	1,106	1,706	1,997	3,584	3,082
300	0,5	8,80	48	40	0,932	0,427	0,733	1,226	3,738	2,640	2,020	3,752
300	0,5	8,80	48	60	0,943	0,431	0,740	1,240	3,740	2,643	2,022	3,756
300	0,5	8,80	48	75	0,947	0,433	0,743	1,246	3,740	2,645	2,023	3,757
300	0,5	8,80	48	90	0,949	0,433	0,746	1,249	3,741	2,645	2,024	3,758
250	0,5	15,64	36	40	0,939	0,447	0,748	1,244	4,401	3,050	2,371	4,385
250	0,5	15,64	36	60	0,951	0,452	0,758	1,262	4,404	3,052	2,374	4,387
250	0,5	15,64	36	75	0,957	0,454	0,762	1,269	4,405	3,053	2,376	4,389
250	0,5	15,64	36	90	0,960	0,455	0,764	1,274	4,405	3,054	2,377	4,389
250	0,5	8,80	48	40	1,094	0,489	0,857	1,440	4,749	3,345	2,524	4,800
250	0,5	8,80	48	60	1,108	0,494	0,868	1,459	4,751	3,349	2,527	4,805
250	0,5	8,80	48	75	1,113	0,496	0,872	1,467	4,752	3,351	2,528	4,807
250	0,5	8,80	48	90	1,117	0,497	0,874	1,472	4,752	3,352	2,529	4,808

Tabella 27 - Filtri ad accordo singolo: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 4



### 5.3.2 Filtri ad accordo singolo: analisi dei risultati ottenuti

Analizzando i risultati sopra riportati si può notare come non esistano combinazioni dei parametri del filtro ad accordo singolo che soddisfino i requisiti armonici in fascia 1 per quanto riguarda entrambe le condizioni di funzionamento, quindi saranno necessarie analisi successive riguardanti tipologie differenti di filtri.

Inoltre, analizzando le prestazioni dei diversi filtri a parità di valore di induttanza del reattore di spianamento e capacità  $C$ , si può evidenziare quanto segue:

- Nel funzionamento bipolare, i filtri con le prestazioni migliori sono quelli accordati alla 24° armonica; in ordine decrescente di prestazioni troviamo i filtri alla 36°, con l'eccezione del caso con capacità  $C$  del filtro da  $0.5 \mu\text{F}$  per cui le prestazioni dei filtri alla 12° sono migliori; inoltre, a parità di frequenza di accordo le prestazioni migliorano al diminuire del fattore di qualità;
- Nel funzionamento monopolare, i filtri con le prestazioni migliori sono quelli accordati alle armoniche caratteristiche di ordine inferiore (quindi la dodicesima e la ventiquattresima), con l'eccezione del caso con  $C=3\mu\text{F}$  nel quale i filtri accordati alla 24° armonica hanno le prestazioni peggiori; anche in questo caso inoltre si può evidenziare un comportamento costante in funzione del fattore di qualità: in particolare, le prestazioni migliorano al diminuire del fattore di qualità.

## 5.4 Verifica delle prestazioni dei filtri: filtri ad accordo singolo smorzati

La struttura di un filtro ad accordo singolo smorzato (o *passa alto* o *dumped* utilizzando la terminologia inglese) è quella già illustrata in figura 8 e qui riportata per comodità.

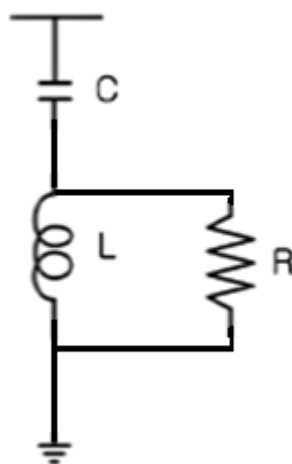


Figura 22 - Filtro ad accordo singolo in configurazione passa alto

I parametri caratteristici di un filtro ad accordo singolo smorzato sono gli stessi del filtro ad accordo singolo presentato nel paragrafo 5.3, quindi:

- Capacità del condensatore;
- Frequenza di accordo del filtro;
- Fattore di qualità.

Da essi si possono ottenere facilmente le tre grandezze circuitali C,L,R: per quanto riguarda la capacità e l'induttanza si opera nella maniera già descritta per la tipologia di filtri già analizzata, mentre la resistenza R si ottiene dal fattore di qualità del filtro e dalla frequenza di risonanza mediante la formula seguente:

---

$$R = 2\pi f_n L * QF \quad (5.3)$$

dove QF è il fattore di qualità del filtro alla frequenza di accordo.

Durante la simulazione i tre parametri caratteristici sono stati fatti variare indipendentemente l'uno rispetto all'altro all'interno degli intervalli seguenti:

- La capacità C e la frequenza di accordo, cui sono stati fatti assumere gli stessi valori già precedentemente analizzati [0.5µF; 1 µF; 2 µF; 3µF] e [12,24,36,48] rispettivamente.
- Il fattore di qualità, cui sono stati fatti assumere i valori [2, 5, 8, 10]<sup>53</sup>.

Considerando il fatto che anche l'induttanza del reattore di spianamento (Ls) è un parametro variabile, complessivamente si sono valutate le prestazioni di 192 filtri.

#### 5.4.1 Filtri ad accordo singolo smorzati – risultati

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati delle simulazioni effettuate: i filtri sono stati suddivisi a seconda delle fasce di prestazione da loro soddisfatte, e ordinati secondo la massima corrente perturbata equivalente misurata nel funzionamento monopolare. Le tabelle mostrano, per ciascun filtro e per ciascuna condizione di funzionamento, la massima corrente perturbata equivalente valutata nelle dieci sezioni di misura.

---

<sup>53</sup> L'intervallo 2/10 per il fattore di qualità dei filtri ad accordo singolo dumped di un impianto HVDC è stato desunto dal documento "Reactive Power Compensation and Harmonic Filters for HVDC Classic", ABB Group.  
[http://www.sari-energy.org/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Workshop\\_Sep\\_2011/presentations/Reactive%20Power%20and%20Harmonic%20Filter\\_ABB.pdf](http://www.sari-energy.org/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Workshop_Sep_2011/presentations/Reactive%20Power%20and%20Harmonic%20Filter_ABB.pdf)

Ls [mH]	C [µF]	L [mH]	Ord_ris	QF	FUNZIONAMENTO BIPOLOARE					FUNZIONAMENTO MONOPOLARE				
					P=300 MW	P=1200 MW	P=2100 MW	P=3000 MW	P=150 MW	P=600 MW	P=1050 MW	P=1500 MW		
					I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]		
350	3	23,45	12	8	0,192	0,252	0,291	0,328	0,575	0,568	0,820	0,667		
350	3	23,45	12	10	0,196	0,271	0,313	0,350	0,543	0,557	0,821	0,643		
350	3	23,45	12	5	0,185	0,215	0,250	0,286	0,683	0,612	0,824	0,752		
350	2	35,18	12	10	0,226	0,365	0,416	0,457	0,657	0,651	0,930	0,767		
350	2	35,18	12	8	0,218	0,338	0,383	0,422	0,706	0,670	0,932	0,805		
300	3	23,45	12	8	0,199	0,283	0,324	0,361	0,659	0,651	0,942	0,765		
300	3	23,45	12	10	0,204	0,305	0,349	0,388	0,622	0,638	0,942	0,737		
350	2	35,18	12	5	0,203	0,282	0,318	0,354	0,845	0,731	0,943	0,917		
300	3	23,45	12	5	0,190	0,238	0,273	0,309	0,783	0,701	0,946	0,863		

Tabella 28 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 1

Ls [mH]	C [µF]	L [mH]	Ord_ris	QF	FUNZIONAMENTO BIPOLOARE					FUNZIONAMENTO MONOPOLARE				
					P=300 MW	P=1200 MW	P=2100 MW	P=3000 MW	P=150 MW	P=600 MW	P=1050 MW	P=1500 MW		
					I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]	I <sub>eq</sub> [A]		
350	3	23,45	12	2	0,189	0,172	0,210	0,243	1,043	0,794	0,871	1,064		
300	2	35,18	12	10	0,244	0,416	0,473	0,515	0,752	0,746	1,067	0,880		
300	2	35,18	12	8	0,234	0,384	0,434	0,475	0,808	0,768	1,069	0,923		
300	2	35,18	12	5	0,215	0,318	0,357	0,394	0,968	0,838	1,082	1,052		
250	3	23,45	12	8	0,211	0,326	0,369	0,408	0,771	0,761	1,104	0,897		
250	3	23,45	12	10	0,218	0,353	0,400	0,441	0,727	0,745	1,104	0,864		
250	3	23,45	12	5	0,199	0,271	0,308	0,343	0,915	0,821	1,109	1,011		
350	2	35,18	12	2	0,195	0,202	0,236	0,266	1,186	0,906	0,993	1,214		
300	3	23,45	12	2	0,191	0,182	0,219	0,252	1,194	0,910	1,000	1,221		
350	1	70,36	12	5	0,282	0,422	0,459	0,497	1,106	0,927	1,223	1,194		
250	2	35,18	12	10	0,276	0,489	0,555	0,602	0,879	0,871	1,250	1,030		
250	2	35,18	12	8	0,263	0,452	0,509	0,554	0,945	0,897	1,252	1,080		
250	2	35,18	12	5	0,240	0,373	0,417	0,457	1,132	0,979	1,267	1,233		
350	1	70,36	12	8	0,314	0,489	0,524	0,570	0,962	0,868	1,326	1,091		

350	1	70,36	12	2	0,243	0,301	0,335	0,361	1,321	1,023	1,142	1,360
350	1	70,36	12	10	0,329	0,519	0,551	0,602	0,895	0,858	1,372	1,127
300	1	70,36	12	5	0,312	0,480	0,521	0,562	1,266	1,060	1,389	1,368
300	2	35,18	12	2	0,201	0,221	0,255	0,285	1,358	1,038	1,139	1,392
250	3	23,45	12	2	0,196	0,198	0,235	0,266	1,394	1,064	1,171	1,431
350	1	17,59	24	10	0,395	0,357	0,352	0,392	1,453	1,006	0,739	1,453
350	1	17,59	24	8	0,394	0,352	0,346	0,385	1,455	1,009	0,755	1,454
350	1	17,59	24	5	0,390	0,341	0,333	0,371	1,463	1,021	0,810	1,460
350	1	17,59	24	2	0,383	0,323	0,322	0,361	1,501	1,081	1,041	1,493
300	1	70,36	12	8	0,350	0,558	0,597	0,648	1,101	0,992	1,503	1,245
300	1	70,36	12	10	0,368	0,593	0,629	0,685	1,024	0,972	1,554	1,278
300	1	70,36	12	2	0,262	0,337	0,374	0,400	1,511	1,171	1,310	1,559
250	1	70,36	12	5	0,346	0,553	0,601	0,647	1,478	1,238	1,607	1,600
250	2	35,18	12	2	0,217	0,255	0,292	0,322	1,585	1,213	1,334	1,630
300	1	17,59	24	10	0,439	0,397	0,384	0,422	1,661	1,151	0,846	1,664
300	1	17,59	24	8	0,437	0,389	0,376	0,414	1,663	1,155	0,864	1,666
300	1	17,59	24	5	0,432	0,374	0,359	0,396	1,672	1,168	0,928	1,672
350	0,5	140,72	12	2	0,300	0,392	0,435	0,460	1,549	1,286	1,697	1,610
350	2	8,80	24	2	0,239	0,187	0,232	0,277	1,707	1,176	0,931	1,682
300	1	17,59	24	2	0,420	0,353	0,342	0,379	1,716	1,238	1,193	1,710
350	2	8,80	24	5	0,236	0,183	0,225	0,270	1,721	1,171	0,834	1,697
350	2	8,80	24	8	0,236	0,185	0,226	0,270	1,725	1,172	0,819	1,703
350	2	8,80	24	10	0,236	0,186	0,226	0,271	1,727	1,173	0,816	1,704
250	1	70,36	12	8	0,393	0,647	0,693	0,751	1,285	1,156	1,733	1,455
350	2	3,91	36	2	0,257	0,201	0,251	0,298	1,767	1,289	1,416	1,720
350	2	3,91	36	5	0,257	0,198	0,247	0,294	1,779	1,299	1,442	1,729
350	2	3,91	36	8	0,257	0,198	0,247	0,294	1,787	1,308	1,466	1,736
250	1	70,36	12	10	0,415	0,689	0,733	0,796	1,196	1,122	1,789	1,474
350	2	3,91	36	10	0,257	0,197	0,247	0,294	1,790	1,312	1,476	1,739
250	1	70,36	12	2	0,277	0,378	0,421	0,449	1,764	1,368	1,534	1,825
350	1	7,82	36	2	0,454	0,370	0,367	0,412	1,723	1,362	1,829	1,671
300	0,5	140,72	12	2	0,328	0,438	0,489	0,518	1,775	1,469	1,932	1,846
250	1	17,59	24	10	0,500	0,456	0,428	0,464	1,936	1,344	0,989	1,946

250	1	17,59	24	8	0,497	0,446	0,418	0,454	1,939	1,349	1,009	1,948
300	2	8,80	24	2	0,247	0,195	0,239	0,285	1,948	1,344	1,065	1,924
350	2	2,20	48	2	0,265	0,210	0,261	0,308	1,915	1,488	1,950	1,852
250	1	17,59	24	5	0,489	0,424	0,396	0,431	1,950	1,365	1,084	1,956
350	3	2,61	36	2	0,230	0,182	0,234	0,278	1,958	1,354	1,153	1,916
300	2	8,80	24	5	0,245	0,192	0,233	0,278	1,964	1,338	0,953	1,942
350	3	2,61	36	5	0,230	0,180	0,231	0,275	1,967	1,357	1,139	1,925
350	1	4,40	48	2	0,479	0,390	0,391	0,441	1,772	1,430	1,968	1,723
300	2	8,80	24	8	0,244	0,195	0,235	0,280	1,969	1,340	0,937	1,948
350	3	2,61	36	8	0,230	0,179	0,231	0,275	1,970	1,359	1,142	1,928
300	2	8,80	24	10	0,245	0,197	0,236	0,281	1,971	1,340	0,933	1,950
350	3	2,61	36	10	0,230	0,179	0,231	0,275	1,971	1,360	1,143	1,929
350	3	1,47	48	2	0,235	0,188	0,241	0,285	1,978	1,407	1,398	1,930
350	3	1,47	48	5	0,235	0,187	0,240	0,284	1,984	1,412	1,409	1,936
350	3	1,47	48	8	0,235	0,187	0,240	0,284	1,987	1,414	1,415	1,938
350	3	1,47	48	10	0,235	0,187	0,239	0,284	1,988	1,415	1,417	1,939

Tabella 29 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 2

Ls [mH]	C [µF]	L [mH]	Ord. ris	QF	FUNZIONAMENTO BIPOLARE					FUNZIONAMENTO MONOPOLARE				
					P=300 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1200 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=2100 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=3000 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=150 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=600 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1050 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1500 MW I <sub>eq</sub> [A]		
250	1	17,59	24	2	0,468	0,393	0,368	0,404	2,002	1,446	1,395	2,000		
350	3	5,86	24	2	0,219	0,172	0,221	0,264	2,012	1,367	0,990	1,979		
300	2	3,91	36	2	0,268	0,210	0,259	0,307	2,017	1,473	1,619	1,969		
300	2	3,91	36	5	0,267	0,206	0,255	0,303	2,031	1,485	1,649	1,979		
300	2	3,91	36	8	0,267	0,206	0,255	0,303	2,040	1,496	1,677	1,987		
350	2	2,20	48	5	0,265	0,208	0,260	0,307	1,949	1,528	2,043	1,881		
300	2	3,91	36	10	0,267	0,206	0,255	0,303	2,044	1,500	1,689	1,990		
350	1	4,40	48	5	0,482	0,391	0,390	0,440	1,804	1,465	2,051	1,746		
350	1	4,40	48	8	0,482	0,391	0,390	0,440	1,813	1,475	2,073	1,754		
350	2	2,20	48	8	0,265	0,208	0,260	0,307	1,961	1,542	2,076	1,891		

350	1	4,40	48	10	0,483	0,391	0,390	0,440	1,816	1,478	2,081	1,756
350	3	5,86	24	5	0,217	0,166	0,214	0,257	2,081	1,407	0,972	2,048
350	2	2,20	48	10	0,265	0,208	0,260	0,307	1,966	1,547	2,088	1,895
350	1	7,82	36	5	0,459	0,372	0,365	0,410	1,822	1,473	2,088	1,752
300	1	7,82	36	2	0,496	0,402	0,389	0,434	1,970	1,558	2,093	1,914
350	3	5,86	24	8	0,217	0,165	0,212	0,256	2,099	1,418	0,974	2,066
350	3	5,86	24	10	0,217	0,165	0,212	0,256	2,105	1,422	0,975	2,071
350	0,5	140,72	12	5	0,394	0,504	0,567	0,582	1,359	1,313	2,113	1,603
350	1	7,82	36	8	0,460	0,373	0,366	0,411	1,864	1,522	2,194	1,789
300	3	2,61	36	2	0,236	0,186	0,238	0,283	2,233	1,546	1,316	2,191
350	1	7,82	36	10	0,461	0,373	0,366	0,411	1,880	1,540	2,234	1,803
300	2	2,20	48	2	0,277	0,219	0,271	0,319	2,188	1,703	2,234	2,120
250	0,5	140,72	12	2	0,370	0,507	0,568	0,602	2,075	1,712	2,239	2,163
300	3	2,61	36	5	0,235	0,183	0,235	0,280	2,244	1,549	1,300	2,201
300	3	2,61	36	8	0,235	0,182	0,235	0,280	2,247	1,552	1,303	2,204
300	3	2,61	36	10	0,235	0,182	0,234	0,279	2,249	1,553	1,305	2,206
300	1	4,40	48	2	0,518	0,417	0,413	0,464	2,025	1,635	2,251	1,973
300	3	1,47	48	2	0,241	0,192	0,246	0,291	2,257	1,607	1,598	2,208
300	3	1,47	48	5	0,241	0,191	0,244	0,289	2,264	1,613	1,610	2,214
300	3	1,47	48	8	0,241	0,191	0,244	0,289	2,267	1,616	1,617	2,217
300	3	1,47	48	10	0,241	0,191	0,244	0,289	2,268	1,617	1,620	2,218
250	2	8,80	24	2	0,267	0,220	0,263	0,309	2,268	1,567	1,243	2,248
350	0,5	140,72	12	8	0,452	0,553	0,640	0,639	1,357	1,375	2,277	1,732
250	2	8,80	24	5	0,264	0,224	0,259	0,305	2,286	1,560	1,112	2,268
250	2	8,80	24	8	0,264	0,227	0,262	0,308	2,292	1,562	1,093	2,275
250	2	8,80	24	10	0,264	0,229	0,263	0,309	2,295	1,563	1,088	2,278
300	3	5,86	24	2	0,224	0,175	0,224	0,267	2,295	1,561	1,131	2,263
300	2	2,20	48	5	0,277	0,218	0,269	0,318	2,227	1,748	2,341	2,154
350	0,5	35,18	24	10	0,428	0,376	0,483	0,596	2,342	1,615	1,144	2,330
350	0,5	35,18	24	8	0,425	0,359	0,463	0,579	2,344	1,617	1,149	2,330
350	0,5	140,72	12	10	0,478	0,573	0,673	0,663	1,356	1,407	2,344	1,800
300	1	4,40	48	5	0,521	0,419	0,412	0,463	2,062	1,675	2,345	2,000
250	2	3,91	36	2	0,291	0,235	0,284	0,333	2,350	1,719	1,892	2,300



350	0,5	35,18	24	5	0,418	0,326	0,420	0,557	2,352	1,623	1,170	2,333
250	2	3,91	36	5	0,290	0,231	0,279	0,328	2,366	1,733	1,928	2,313
300	1	4,40	48	8	0,522	0,419	0,412	0,463	2,072	1,686	2,371	2,008
300	0,5	140,72	12	5	0,434	0,570	0,643	0,663	1,527	1,476	2,371	1,819
300	3	5,86	24	5	0,221	0,168	0,216	0,260	2,374	1,607	1,111	2,341
250	2	3,91	36	8	0,290	0,230	0,279	0,328	2,376	1,746	1,961	2,322
300	2	2,20	48	8	0,277	0,217	0,269	0,318	2,241	1,764	2,379	2,166
300	1	4,40	48	10	0,522	0,420	0,412	0,463	2,076	1,690	2,379	2,011
250	2	3,91	36	10	0,290	0,230	0,279	0,328	2,381	1,751	1,975	2,326
300	1	7,82	36	5	0,502	0,405	0,388	0,431	2,082	1,686	2,389	2,007
300	2	2,20	48	10	0,277	0,217	0,269	0,318	2,246	1,770	2,393	2,170
300	3	5,86	24	8	0,221	0,168	0,215	0,259	2,394	1,619	1,112	2,362
300	3	5,86	24	10	0,221	0,168	0,214	0,259	2,401	1,624	1,113	2,368
350	0,5	35,18	24	2	0,408	0,289	0,378	0,527	2,407	1,671	1,262	2,374
250	1	7,82	36	2	0,534	0,427	0,410	0,460	2,298	1,820	2,446	2,239
300	1	7,82	36	8	0,504	0,407	0,388	0,431	2,130	1,741	2,511	2,050
300	0,5	140,72	12	8	0,505	0,629	0,731	0,730	1,516	1,540	2,549	1,961
300	1	7,82	36	10	0,505	0,408	0,388	0,431	2,149	1,761	2,556	2,066
250	3	2,61	36	2	0,244	0,191	0,244	0,290	2,598	1,801	1,535	2,558
250	3	2,61	36	5	0,243	0,188	0,240	0,286	2,610	1,805	1,515	2,569
250	3	2,61	36	8	0,243	0,188	0,240	0,286	2,614	1,808	1,518	2,572
250	2	2,20	48	2	0,301	0,245	0,296	0,346	2,550	1,989	2,615	2,479
250	3	2,61	36	10	0,243	0,187	0,240	0,286	2,616	1,809	1,520	2,574
300	0,5	140,72	12	10	0,537	0,653	0,771	0,759	1,512	1,573	2,624	2,038
250	3	1,47	48	2	0,250	0,198	0,253	0,299	2,626	1,873	1,866	2,578
250	1	4,40	48	2	0,547	0,432	0,432	0,495	2,361	1,909	2,628	2,307
250	3	1,47	48	5	0,250	0,197	0,251	0,297	2,635	1,880	1,880	2,585
250	3	1,47	48	8	0,250	0,197	0,251	0,297	2,638	1,884	1,889	2,588
250	3	1,47	48	10	0,250	0,197	0,251	0,297	2,639	1,885	1,892	2,589
250	3	5,86	24	2	0,230	0,180	0,229	0,273	2,670	1,819	1,319	2,642
250	0,5	140,72	12	5	0,495	0,663	0,753	0,777	1,743	1,687	2,700	2,102
250	1	4,40	48	5	0,551	0,434	0,431	0,494	2,404	1,954	2,737	2,338
250	2	2,20	48	5	0,301	0,243	0,295	0,344	2,596	2,043	2,742	2,519



250	3	5,86	24	5	0,227	0,174	0,220	0,265	2,761	1,871	1,294	2,732
250	1	4,40	48	8	0,552	0,434	0,431	0,494	2,416	1,967	2,767	2,348
250	1	4,40	48	10	0,552	0,434	0,431	0,495	2,420	1,972	2,777	2,352
250	3	5,86	24	8	0,227	0,174	0,219	0,264	2,784	1,886	1,296	2,756
250	2	2,20	48	8	0,301	0,243	0,294	0,344	2,613	2,062	2,786	2,533
250	3	5,86	24	10	0,227	0,175	0,219	0,263	2,792	1,891	1,297	2,763
250	1	7,82	36	5	0,542	0,432	0,409	0,458	2,429	1,968	2,792	2,348
300	0,5	35,18	24	10	0,462	0,419	0,537	0,663	2,795	1,929	1,360	2,792
300	0,5	35,18	24	8	0,459	0,399	0,514	0,639	2,798	1,930	1,367	2,792
250	2	2,20	48	10	0,301	0,243	0,294	0,344	2,619	2,069	2,802	2,539
300	0,5	35,18	24	5	0,450	0,356	0,463	0,612	2,808	1,938	1,391	2,795
300	0,5	35,18	24	2	0,437	0,302	0,405	0,574	2,873	1,994	1,494	2,846
350	0,5	15,64	36	5	0,681	0,341	0,546	0,889	2,891	2,004	1,698	2,840
350	0,5	15,64	36	8	0,690	0,346	0,554	0,902	2,892	2,004	1,727	2,840
350	0,5	15,64	36	10	0,693	0,348	0,556	0,906	2,893	2,005	1,737	2,840
350	0,5	15,64	36	2	0,654	0,333	0,528	0,853	2,894	2,011	1,602	2,851
250	0,5	140,72	12	8	0,581	0,735	0,859	0,858	1,718	1,751	2,896	2,261
250	1	7,82	36	8	0,545	0,434	0,409	0,459	2,485	2,033	2,934	2,398
250	0,5	140,72	12	10	0,621	0,764	0,908	0,892	1,708	1,785	2,986	2,348
250	1	7,82	36	10	0,546	0,435	0,410	0,459	2,506	2,057	2,987	2,417

Tabella 30 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 3

Ls [mH]	C [µF]	L [mH]	Ord_ris	QF	FUNZIONAMENTO BIPOLARE						FUNZIONAMENTO MONOPOLARE			
					P=300 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1200 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=2100 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=3000 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=150 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=600 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1050 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1500 MW I <sub>eq</sub> [A]		
350	0,5	8,80	48	5	0,822	0,391	0,650	1,078	3,085	2,173	1,685	3,072		
350	0,5	8,80	48	2	0,799	0,386	0,635	1,048	3,085	2,168	1,682	3,068		
350	0,5	8,80	48	8	0,828	0,393	0,655	1,086	3,086	2,177	1,688	3,077		
350	0,5	8,80	48	10	0,830	0,394	0,656	1,089	3,086	2,180	1,689	3,079		
250	0,5	35,18	24	10	0,520	0,482	0,617	0,762	3,470	2,396	1,683	3,486		
250	0,5	35,18	24	8	0,515	0,459	0,588	0,733	3,473	2,398	1,691	3,486		
300	0,5	15,64	36	5	0,777	0,371	0,618	1,021	3,488	2,417	1,945	3,447		
300	0,5	15,64	36	8	0,789	0,378	0,628	1,038	3,490	2,418	1,978	3,447		
300	0,5	15,64	36	10	0,793	0,381	0,632	1,044	3,490	2,418	1,989	3,447		
250	0,5	35,18	24	5	0,504	0,407	0,526	0,700	3,484	2,406	1,719	3,491		
300	0,5	15,64	36	2	0,740	0,359	0,592	0,970	3,493	2,425	1,876	3,459		
250	0,5	35,18	24	2	0,487	0,332	0,454	0,649	3,566	2,475	1,837	3,556		
300	0,5	8,80	48	2	0,910	0,423	0,718	1,196	3,739	2,623	2,010	3,736		
300	0,5	8,80	48	5	0,940	0,430	0,738	1,236	3,738	2,628	2,014	3,740		
300	0,5	8,80	48	8	0,948	0,433	0,745	1,248	3,739	2,633	2,017	3,746		
300	0,5	8,80	48	10	0,951	0,434	0,747	1,252	3,740	2,635	2,019	3,748		
250	0,5	15,64	36	5	0,925	0,427	0,733	1,224	4,402	3,051	2,353	4,389		
250	0,5	15,64	36	8	0,943	0,437	0,748	1,250	4,404	3,052	2,363	4,389		
250	0,5	15,64	36	10	0,950	0,441	0,753	1,259	4,404	3,052	2,367	4,389		
250	0,5	15,64	36	2	0,870	0,408	0,693	1,147	4,409	3,061	2,333	4,404		
250	0,5	8,80	48	2	1,062	0,481	0,836	1,397	4,750	3,327	2,513	4,783		
250	0,5	8,80	48	5	1,104	0,492	0,864	1,453	4,750	3,332	2,518	4,788		
250	0,5	8,80	48	8	1,115	0,496	0,873	1,469	4,751	3,338	2,522	4,794		
250	0,5	8,80	48	10	1,119	0,498	0,876	1,475	4,752	3,341	2,523	4,797		

Tabella 31 - Filtri passa alto: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 4

---

#### 5.4.2 Filtri ad accordo singolo smorzati: analisi dei risultati ottenuti

Analizzando i risultati sopra riportati si può notare come esistano combinazioni dei parametri del filtro passa alto che soddisfano i requisiti armonici in fascia 1 contemporaneamente per quanto riguarda sia il funzionamento monopolare che quello bipolare.

Inoltre, analizzando le prestazioni dei diversi filtri a parità di valore di induttanza del reattore di spianamento e capacità  $C$ , si può evidenziare quanto segue:

- Nel funzionamento bipolare, i filtri con le prestazioni migliori sono quelli accordati alla 12° armonica (con  $QF=2$ ) e alla 24°; al contrario di quanto evidenziato per i filtri ad accordo singolo non vi è una regolarità delle prestazioni in funzione dei valori assunti dal fattore di qualità;
- Nel funzionamento monopolare i filtri con le prestazioni migliori sono quelli accordati alle armoniche caratteristiche di ordine inferiore (quindi la dodicesima e la ventiquattresima), con l'eccezione del caso con  $C=3\mu F$  nel quale i filtri accordati alla 24° armonica hanno le prestazioni peggiori; anche in questo caso inoltre non si è in grado di evidenziare un comportamento regolare in funzione del valore assunto dal fattore di qualità.

## 5.5 Verifica delle prestazioni dei filtri – Filtri ad accordo doppio

I filtri che generalmente si installano lato corrente continua in un impianto HVDC sono filtri doppiamente accordati [23,24]. I filtri ad accordo doppio hanno un comportamento assimilabile a quello di due filtri singoli in parallelo: all'atto pratico si realizzano filtri doppi e non coppie di filtri singoli in parallelo per i motivi seguenti [4,21]:

- Un filtro doppio ha perdite minori rispetto al parallelo dei due filtri singoli a parità di prestazioni;
- Si riducono i costi fissi d'acquisto dei componenti costituenti il filtro, in quanto vi è una sola capacità principale (cioè quella interessata dalla piena tensione) al contrario delle due dei filtri singoli.

In questa fase si è quindi proceduto con un'analisi delle prestazioni di filtri doppiamente accordati - il cui schema circuitale è riportato nella figura seguente - sintetizzando i loro parametri sulla base di filtri singoli corrispondenti.

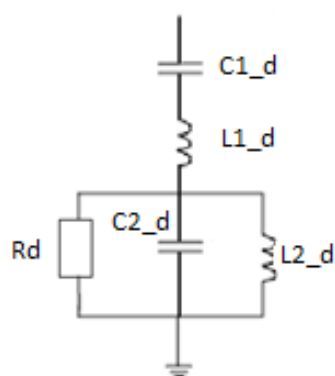


Figura 23 - Schema circuitale di un filtro ad accordo doppio

Al fine di scegliere i parametri da assegnare a questi filtri ci si è basati sui risultati ottenuti dagli studi già condotti sui filtri ad accordo singolo.

In particolare sono state fatte le seguenti considerazioni:

- Per poter confrontare le prestazioni dei filtri singoli e doppi a parità di taglia, si è deciso di assegnare alla capacità principale del filtro doppio ( $C_{1\_d}$ ) i valori delle capacità dei filtri ad accordo singolo che hanno avuto i risultati migliori nelle simulazioni precedenti: si sono quindi testati filtri doppi con  $C_{1\_d}=[2 \mu\text{F}; 3 \mu\text{F}]$ .
- Per limitare il numero di casi oggetto di studio si è deciso di accordare il filtro doppio alle frequenze per le quali si sono avuti i migliori risultati per quanto riguarda i filtri singoli nel funzionamento monopolare<sup>54</sup> (quindi la dodicesima e la ventiquattresima armonica): esse sono inoltre le armoniche che maggiormente causano disturbi (si veda a tal proposito il Grafico 22) quindi la scelta ha questa ulteriore giustificazione.

Dato il valore di capacità principale del filtro doppio, la sintesi dei suoi parametri è avvenuta utilizzando le uguaglianze già presentate nel paragrafo 2.3.2.3. In particolare, si è immaginato che il filtro doppio realizzasse il parallelo di due filtri ad accordo singolo (il primo accordato alla dodicesima armonica, l'altro alla ventiquattresima) aventi ciascuno fattore di qualità pari a 40<sup>55</sup> e capacità pari rispettivamente ad ' $aC_{1\_d}$ ' e ' $(1-a)C_{1\_d}$ ' (vedi figura seguente).

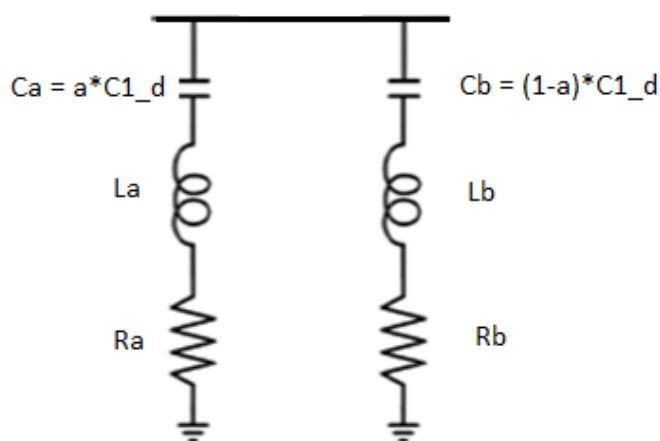


Figura 24 - Filtri ad accordo singolo utilizzati per il calcolo dei parametri del filtro ad accordo doppio

<sup>54</sup> Si è già evidenziato come il funzionamento monopolare fosse più critico per quanto riguarda il rispetto dei limiti rispetto a quello bipolare.

<sup>55</sup> Si è già evidenziato come le prestazioni dei filtri ad accordo singolo fossero migliori, a parità di valori di induttanza e capacità, per  $QF=40$ .

Si è scelto che il parametro  $a$  potesse assumere i valori seguenti: 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8.

Nota  $C_{1-d}$ , al variare della ripartizione della capacità complessiva (quindi del parametro  $a$ ) si sono dapprima calcolati i parametri dei due filtri ad accordo singolo mediante le formule seguenti (osservazione: il filtro caratterizzato dai pedici 'a' è accordato alla 12° armonica, mentre quello con i pedici 'b' è accordato alla 24°).

$$L_a = \left( \frac{1}{2\pi * 12 * 50 \sqrt{a * C_{1-d}}} \right)^2 \quad (5.4)$$

$$L_b = \left( \frac{1}{2\pi * 24 * 50 \sqrt{(1-a) * C_{1-d}}} \right)^2 \quad (5.5)$$

$$R_a = \frac{2\pi * 12 * 50 * L_a}{40} \quad (5.6)$$

$$R_b = \frac{2\pi * 24 * 50 * L_b}{40} \quad (5.7)$$

A questo punto si sono calcolati i valori dei rimanenti parametri conservativi (induttanze e capacità) del filtro doppio corrispondente al parallelo delle due strutture di cui sopra mediante le formule dimostrate in appendice: si hanno quindi le relazioni seguenti:

$$L_{1-d} = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (5.8)$$

$$C_{2-d} = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(C_a L_a - C_b L_b)^2} \quad (5.9)$$

$$L_{2-d} = \frac{(C_a L_a - C_b L_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \quad (5.10)$$

Sono quindi noti tutti i parametri del filtro doppio ad eccezione della resistenza  $R_d$ . La sua determinazione non può essere fatta in maniera univoca imponendo l'uguaglianza delle impedenze dei due filtri singoli in parallelo e del filtro doppio, in quanto la soluzione analitica del sistema di equazioni che si ottiene è matematicamente impossibile<sup>56</sup>. Si è

---

<sup>56</sup> Si ha un numero di equazioni sovrabbondanti rispetto alle incognite.

pertanto scelto di giungere alla valutazione del parametro resistivo  $R_d$  mediante un processo atto a minimizzare la differenza fra l'impedenza del parallelo dei due filtri singoli e quella del filtro doppio in alcuni punti significativi.

Dapprima si è testato un algoritmo semplice (*Algoritmo A*), che minimizzasse gli scarti fra le impedenze dei filtri singoli ( $Z_{\text{due\_singoli}}(j\omega)$ ) e del filtro doppio ( $Z_{\text{doppio}}(j\omega)$ ) in corrispondenza delle frequenze di risonanza. Di seguito si riportano gli andamenti in funzione della pulsazione delle due impedenze: è evidente come l'andamento sia pressoché uguale su tutto lo spettro di interesse ad eccezione degli intorno del picco compreso fra le due frequenze di accordo.

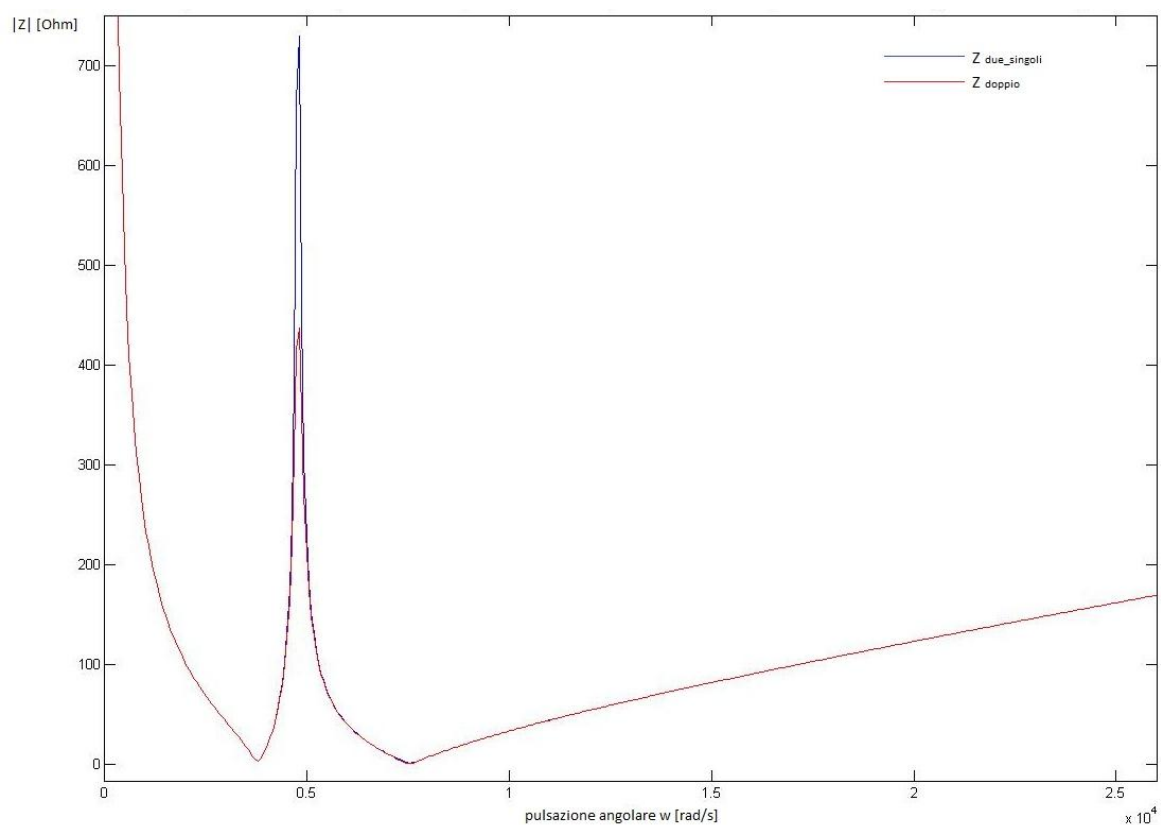


Grafico 23 - Confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente  $R_d$  ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo A

E' quindi sorto il problema di ridurre la differenza fra le due impedenze in corrispondenza del picco. Per questo motivo si è introdotto un secondo algoritmo (*Algoritmo B*) più sofisticato. Esso dapprima valuta la pulsazione in corrispondenza della quale si ha il picco, cercando il massimo locale della funzione  $Z_{due\_singoli}(j\omega)$  nell'intervallo compreso fra le due pulsazioni di risonanza. Quindi, calcola il valore di  $R_d$  che minimizza la funzione  $diff(\omega)$  (vedi sotto), che tiene conto delle differenze tra i valori delle impedenze  $Z_{due\_singoli}$  e  $Z_{doppio}$  in corrispondenza delle frequenze di accordo e del picco tra esse compreso. Inoltre, essendo in valore assoluto le impedenze molto maggiori in corrispondenza del picco, le differenze sono state espresse in valore relativo rispetto al valore assunto dalla funzione  $Z_{due\_singoli}$  alla pulsazione di interesse: ciò è servito per non sbilanciare la minimizzazione verso la semplice riduzione delle differenze in corrispondenza del picco centrale, cosa che si sarebbe verificata mantenendo una valutazione sui valori assoluti.

$$diff(\omega) = \left| \frac{Z_{due\_singoli}(j\omega_{r1}) - Z_{doppio}(j\omega_{r1})}{Z_{due\_singoli}(j\omega_{r1})} \right| + \left| \frac{Z_{due\_singoli}(j\omega_{r2}) - Z_{doppio}(j\omega_{r2})}{Z_{due\_singoli}(j\omega_{r2})} \right| + \left| \frac{Z_{due\_singoli}(j\omega_p) - Z_{doppio}(j\omega_p)}{Z_{due\_singoli}(j\omega_p)} \right| \quad (5.11)$$

con

$\omega_{r1}$  pulsazione corrispondente alla prima frequenza di risonanza (600 Hz);

$\omega_{r2}$  pulsazione corrispondente alla seconda frequenza di risonanza (1200 Hz);

$\omega_p$  pulsazione corrispondente al massimo locale compreso fra  $\omega_{r1}$  e  $\omega_{r2}$ .

La figura seguente mostra i risultati ottenuti con il calcolo di  $R_d$  mediante l'algoritmo B: è evidente come si siano risolti i problemi dovuti alla differenza fra i valori delle impedenze in corrispondenza del picco.



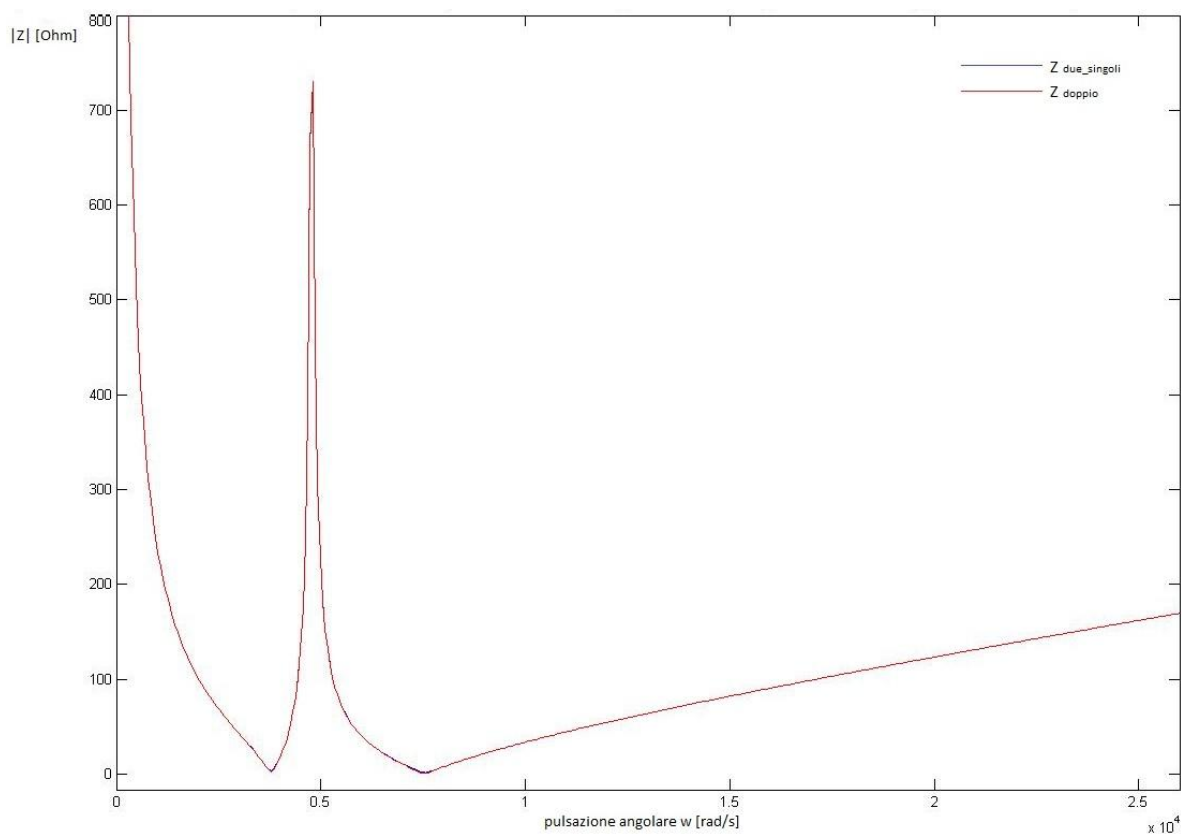


Grafico 24 - Confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente  $R_d$  ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo B

Come scontato, si ha un leggero peggioramento in corrispondenza delle pulsazioni di risonanza utilizzando l'algoritmo B al posto dell'algoritmo A: questa variazione è però sufficientemente contenuta (si vedano in proposito i due grafici seguenti) da giustificare l'utilizzo dell'algoritmo B per il calcolo del parametro resistivo dei filtri doppi che si sono valutati.

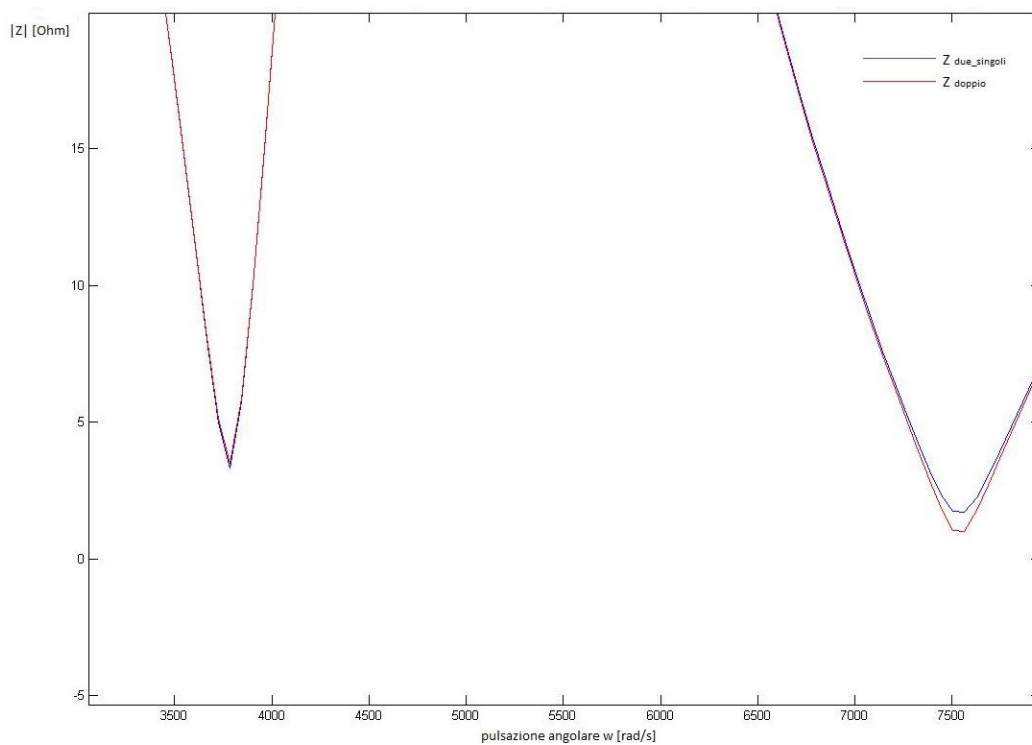


Grafico 25 - Zoom: confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente  $R_d$  ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo A

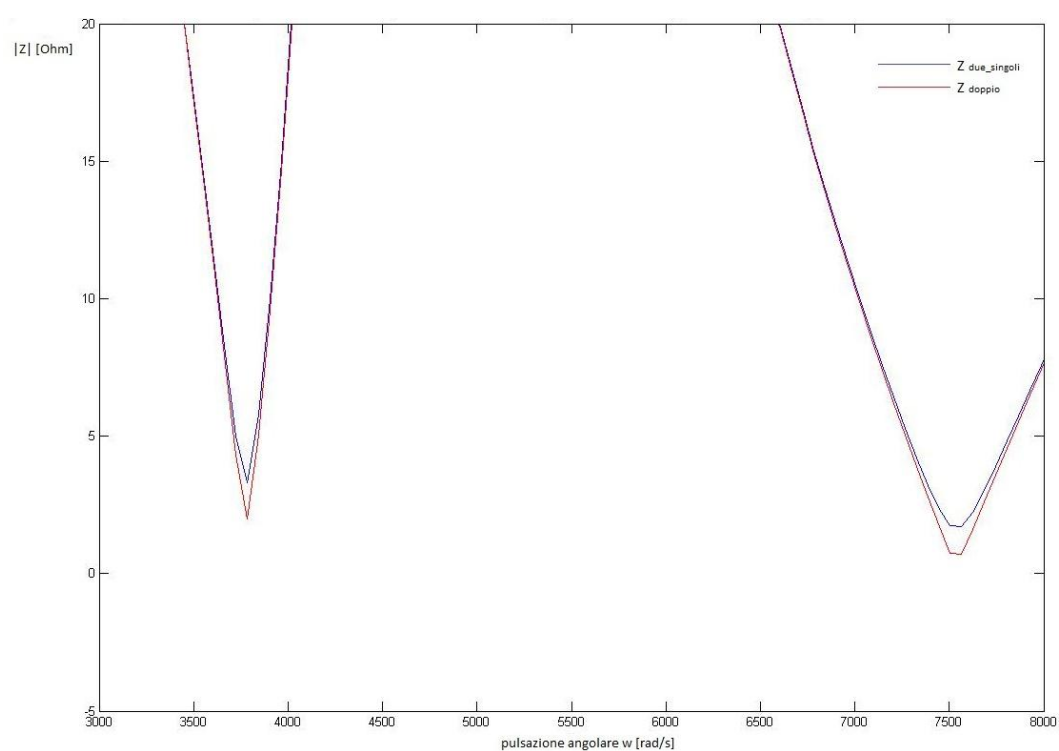


Grafico 26 - Zoom: confronto fra le impedenze di due filtri singoli in parallelo e il filtro doppio corrispondente, avente  $R_d$  ottenuta mediante minimizzazione secondo l'algoritmo B

Specificata la procedura per valutare i cinque parametri circuitali del filtro doppio, si è potuti procedere con le simulazioni.

Si sottolinea inoltre come l'induttanza del reattore di spianamento sia stata mantenuta – al pari dei casi precedentemente esaminati – come un parametro che può assumere i valori 250 mH, 300 mH, 350 mH.

Da ultimo, si ribadisce l'installazione di una capacità di neutro da 20  $\mu$ F.

Complessivamente, si sono valutate le prestazioni di 42 filtri ad accordo doppio.

### **5.5.1 Filtri ad accordo doppio: risultati**

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati delle simulazioni effettuate: i filtri sono stati suddivisi a seconda delle fasce di prestazione da loro soddisfatte, e ordinati secondo la massima corrente perturbata equivalente misurata nel funzionamento monopolare. Le tabelle mostrano, per ciascun filtro e per ciascuna condizione di funzionamento, la massima corrente perturbata equivalente valutata nelle dieci sezioni di misura.

Ls [mH]	Cs [μF]	Cb [μF]	C1d [μF]	C2d [μF]	L1d [mH]	L2d [mH]	Ra [Ω]	FUNZIONAMENTO BIPOLARE					FUNZIONAMENTO MONOPOLARE				
								P=300 MW Ieq [A]	P=1200 MW Ieq [A]	P=2100 MW Ieq [A]	P=3000 MW Ieq [A]	P=150 MW Ieq [A]	P=600 MW Ieq [A]	P=1050 MW Ieq [A]	P=1500 MW Ieq [A]		
350	1,2	1,8	3	10,9	8,4	4,5	854	0,295	0,188	0,262	0,401	0,156	0,181	0,190	0,263		
350	1,5	1,5	3	8,3	9,4	5,3	1064	0,226	0,181	0,238	0,296	0,129	0,182	0,198	0,264		
350	1,8	1,2	3	6,7	10,7	5,8	1243	0,184	0,188	0,227	0,238	0,116	0,192	0,210	0,277		
350	0,9	2,1	3	15,3	7,6	3,6	631	0,235	0,173	0,226	0,287	0,208	0,195	0,191	0,286		
350	2,1	0,9	3	5,7	12,3	5,8	1353	0,199	0,213	0,256	0,275	0,113	0,209	0,227	0,298		
300	1,2	1,8	3	10,9	8,4	4,5	854	0,321	0,199	0,279	0,436	0,176	0,207	0,217	0,301		
300	1,5	1,5	3	8,3	9,4	5,3	1064	0,253	0,195	0,257	0,337	0,144	0,208	0,225	0,302		
300	1,8	1,2	3	6,7	10,7	5,8	1243	0,187	0,202	0,240	0,249	0,129	0,220	0,239	0,317		
350	2,4	0,6	3	5,3	14,7	5,3	1317	0,221	0,256	0,310	0,296	0,236	0,223	0,218	0,327		
350	1	1	2	5,6	14,1	7,9	1596	0,264	0,247	0,303	0,374	0,172	0,233	0,242	0,335		
300	2,1	0,9	3	5,7	12,3	5,8	1353	0,204	0,232	0,274	0,292	0,126	0,239	0,259	0,342		
350	1,2	0,8	2	4,5	16,0	8,6	1865	0,208	0,272	0,306	0,321	0,148	0,241	0,253	0,343		
250	1,2	1,8	3	10,9	8,4	4,5	854	0,360	0,216	0,310	0,487	0,203	0,241	0,252	0,353		
250	1,5	1,5	3	8,3	9,4	5,3	1064	0,293	0,215	0,285	0,395	0,166	0,243	0,262	0,354		
350	1,4	0,6	2	3,8	18,5	8,7	2030	0,224	0,320	0,362	0,383	0,139	0,258	0,271	0,363		
350	0,6	2,4	3	24,1	6,9	2,5	405	0,223	0,168	0,218	0,268	0,320	0,249	0,215	0,365		
250	0,9	2,1	3	15,3	7,6	3,6	631	0,252	0,190	0,245	0,312	0,274	0,261	0,254	0,383		
300	1	1	2	5,6	14,1	7,9	1596	0,297	0,276	0,338	0,434	0,195	0,267	0,276	0,384		
300	1,2	0,8	2	4,5	16,0	8,6	1865	0,220	0,303	0,338	0,354	0,167	0,276	0,289	0,393		
350	1,6	0,4	2	3,6	22,0	7,9	1975	0,256	0,384	0,454	0,481	0,145	0,289	0,305	0,395		
250	2,1	0,9	3	5,7	12,3	5,8	1353	0,211	0,261	0,301	0,319	0,143	0,279	0,302	0,400		
300	1,4	0,6	2	3,8	18,5	8,7	2030	0,236	0,359	0,403	0,426	0,157	0,295	0,310	0,416		
300	0,6	2,4	3	24,1	6,9	2,5	405	0,228	0,173	0,223	0,274	0,365	0,285	0,245	0,419		
300	0,6	1,4	2	10,2	11,3	5,4	947	0,286	0,233	0,286	0,366	0,332	0,301	0,279	0,439		
250	2,4	0,6	3	5,3	14,7	5,3	1317	0,243	0,323	0,380	0,400	0,152	0,312	0,335	0,442		
250	1,2	0,8	2	4,5	16,0	8,6	1865	0,244	0,354	0,390	0,419	0,193	0,322	0,338	0,460		

250	1,4	0,6	2	3,8	18,5	8,7	2030	0,260	0,419	0,465	0,491	0,181	0,345	0,362	0,487
250	0,6	2,4	3	24,1	6,9	2,5	405	0,235	0,182	0,231	0,285	0,425	0,334	0,285	0,490
350	0,4	1,6	2	16,1	10,3	3,7	608	0,246	0,201	0,246	0,302	0,442	0,340	0,281	0,496
250	0,6	1,4	2	10,2	11,3	5,4	947	0,311	0,268	0,323	0,419	0,387	0,353	0,326	0,515
300	0,4	1,6	2	16,1	10,3	3,7	608	0,256	0,216	0,260	0,319	0,505	0,390	0,322	0,570
250	0,4	1,6	2	16,1	10,3	3,7	608	0,276	0,249	0,293	0,355	0,590	0,456	0,376	0,668

Tabella 32 - Filtri ad accordo doppio: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 1

L <sub>s</sub> [mH]	C <sub>a</sub> [µF]	C <sub>b</sub> [µF]	C <sub>1 d</sub> [µF]	C <sub>2 d</sub> [µF]	L <sub>1 d</sub> [mH]	L <sub>2 d</sub> [mH]	R <sub>a</sub> [Ω]	FUNZIONAMENTO BIPOLARE					FUNZIONAMENTO MONOPOLARE				
								P=300 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1200 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=2100 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=3000 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=150 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=600 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1050 MW I <sub>eq</sub> [A]	P=1500 MW I <sub>eq</sub> [A]		
350	0,8	1,2	2	7,3	12,6	6,8	1281	0,435	0,253	0,367	0,582	0,214	0,237	0,237	0,343		
300	0,8	1,2	2	7,3	12,6	6,8	1281	0,482	0,281	0,407	0,644	0,244	0,271	0,271	0,393		
250	1	1	2	5,6	14,1	7,9	1596	0,352	0,323	0,394	0,518	0,225	0,311	0,322	0,449		
300	1,6	0,4	2	3,6	22,0	7,9	1975	0,274	0,434	0,510	0,540	0,164	0,330	0,347	0,453		
250	0,8	1,2	2	7,3	12,6	6,8	1281	0,551	0,334	0,474	0,737	0,283	0,317	0,316	0,460		
250	1,6	0,4	2	3,6	22,0	7,9	1975	0,305	0,506	0,590	0,624	0,189	0,385	0,403	0,529		

Tabella 33 - Filtri ad accordo doppio: risultati - Filtri con prestazioni in fascia 2

### 5.5.2 Filtri ad accordo doppio: analisi dei risultati ottenuti

Analizzando i risultati sopra riportati si nota come quasi tutte le combinazioni dei parametri del filtro ad accordo doppio soddisfano i requisiti armonici in fascia 1 sia per quanto riguarda il funzionamento monopolare che quello bipolare: i filtri che non lo fanno sono in difetto nel funzionamento bipolare.

Inoltre, analizzando le prestazioni dei diversi filtri a parità di valore di induttanza del reattore di spianamento e capacità  $C$ , si può evidenziare quanto segue:

- Nel funzionamento bipolare non si evidenziano regolarità nel comportamento dei filtri al variare dei diversi parametri.
- Nel funzionamento monopolare, invece, si hanno le prestazioni migliori (a parità di valori di  $L_s$  e di  $C_{1_d}$ ) per i filtri corrispondenti a fattori di ripartizione “equilibrati”, quindi corrispondenti a valori di  $a$  pari a 0.4; 0.5; 0.6: le prestazioni cioè sono migliori quando i due filtri singoli corrispondenti al filtro doppio hanno capacità simili. Si nota come con i fattori di ripartizione sopra indicati le capacità dei filtri singoli siano rispettivamente:
  - Se  $C_{1_d}=2 \mu\text{F}$ 
    - $C_a=0.8 \mu\text{F}$  e  $C_b=1.2 \mu\text{F}$  per  $a=0.4$ ;
    - $C_a=1 \mu\text{F}$  e  $C_b=1 \mu\text{F}$  per  $a=0.5$ ;
    - $C_a=1.2 \mu\text{F}$  e  $C_b=0.8 \mu\text{F}$  per  $a=0.6$ ;
  - Se  $C_{1_d}=3 \mu\text{F}$ 
    - $C_a=1.2 \mu\text{F}$  e  $C_b=1.8 \mu\text{F}$  per  $a=0.4$ ;
    - $C_a=1.5 \mu\text{F}$  e  $C_b=1.5 \mu\text{F}$  per  $a=0.5$ ;
    - $C_a=1.8 \mu\text{F}$  e  $C_b=1.2 \mu\text{F}$  per  $a=0.6$ ;

Questo fatto risalta con evidenza dai grafici seguenti, dove sono rappresentati i valori del fattore di ripartizione  $a$  in funzione della massima corrente perturbata equivalente per i due funzionamenti monopolare e bipolare. Si nota come nel primo caso vi sia una certa regolarità, e si evidenzino i risultati migliori in corrispondenza dei valori più “equilibrati” del fattore  $a$ , mentre la stessa cosa non avviene con il secondo grafico.

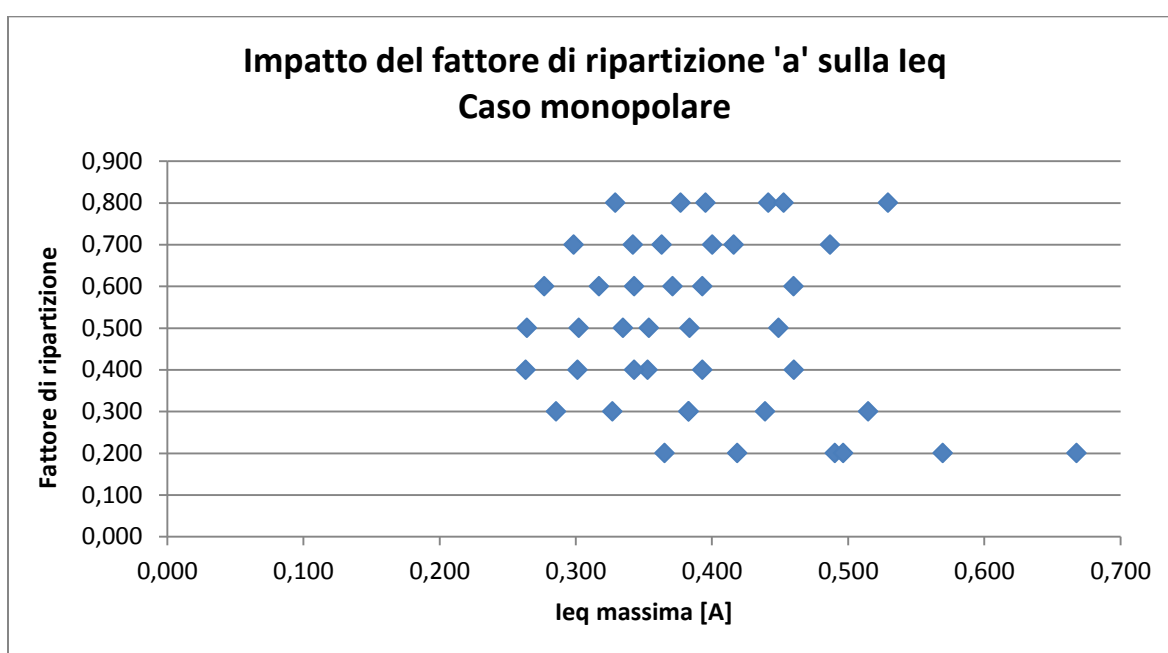


Grafico 27 - Influenza del fattore di ripartizione della capacità principale sulla corrente perturbata equivalente  
- Funzionamento monopolare

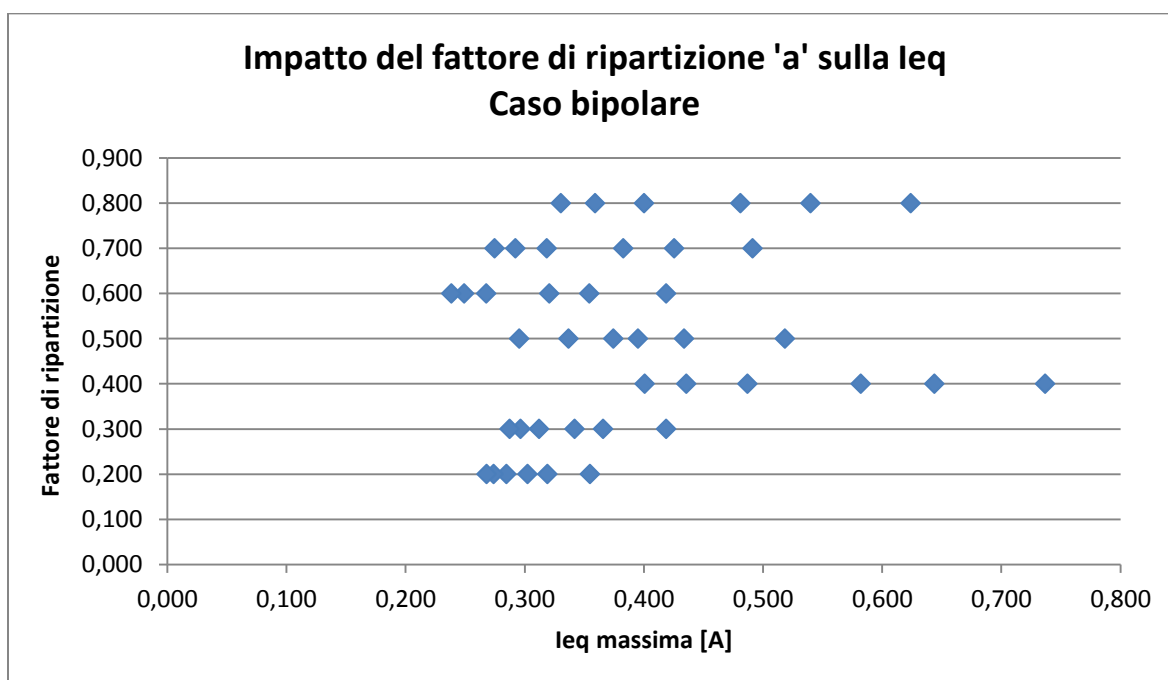


Grafico 28- Influenza del fattore di ripartizione della capacità principale sulla corrente perturbata equivalente  
- Funzionamento bipolare

## 5.6 Analisi dell'influenza di alcuni parametri significativi sulle prestazioni dei filtri

Da ultimo, si è effettuata un'analisi al fine di valutare se esistessero – e quali fossero – i fattori che più influenzano le prestazioni armoniche dei filtri. Per fare ciò, si sono considerati tutti i 426 filtri<sup>57</sup> dei quali si sono simulate le prestazioni, e si sono rappresentati graficamente – per ciascuna configurazione dell'impianto (monopolare e bipolare) – le coppie di valori ('I<sub>eq</sub> massima', 'valore assunto dal parametro d'interesse'). I parametri che sono stati analizzati sono quelli comuni alle diverse tipologie di filtro, quindi:

1. Induttanza  $L_s$  del reattore di spianamento;
2. Valore della capacità principale dei filtri;
3. Ordine di risonanza dei filtri (o “ordini” nel caso dei filtri doppi);
4. Tipologia di filtro;
5. Fattore di qualità dei filtri;

Eccezion fatta per i grafici riguardanti la tipologia di filtro, si sono evidenziati i punti corrispondenti a strutture differenti dei filtri utilizzando colorazioni diverse, secondo quanto riportato nella legenda seguente:

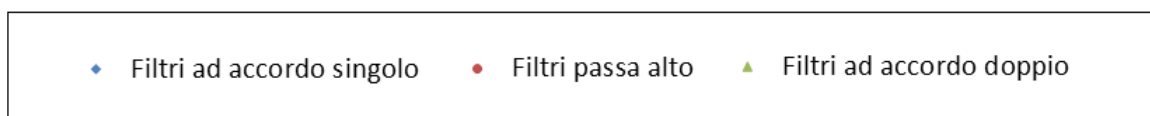


Figura 25 - Legenda valida per i grafici dal n°29 al n°34, e per i grafici 38 e 39

In alcuni casi sono state rappresentate anche delle linee di tendenza per evidenziare gli andamenti ed agevolare l'interpretazione dei dati. I colori delle linee di tendenza ricalcano quelli della legenda soprastante.

<sup>57</sup> Considerando quindi contemporaneamente filtri ad accordo singolo (192), filtri singoli smorzati (192) e filtri doppiamente accordati (42).



### 5.6.1 Induttanza del reattore di spianamento

I grafici seguenti mostrano i risultati dell'analisi condotta riguardo l'influenza dell'induttanza  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri: il primo grafico si riferisce al funzionamento bipolare, il secondo a quello monopolare.

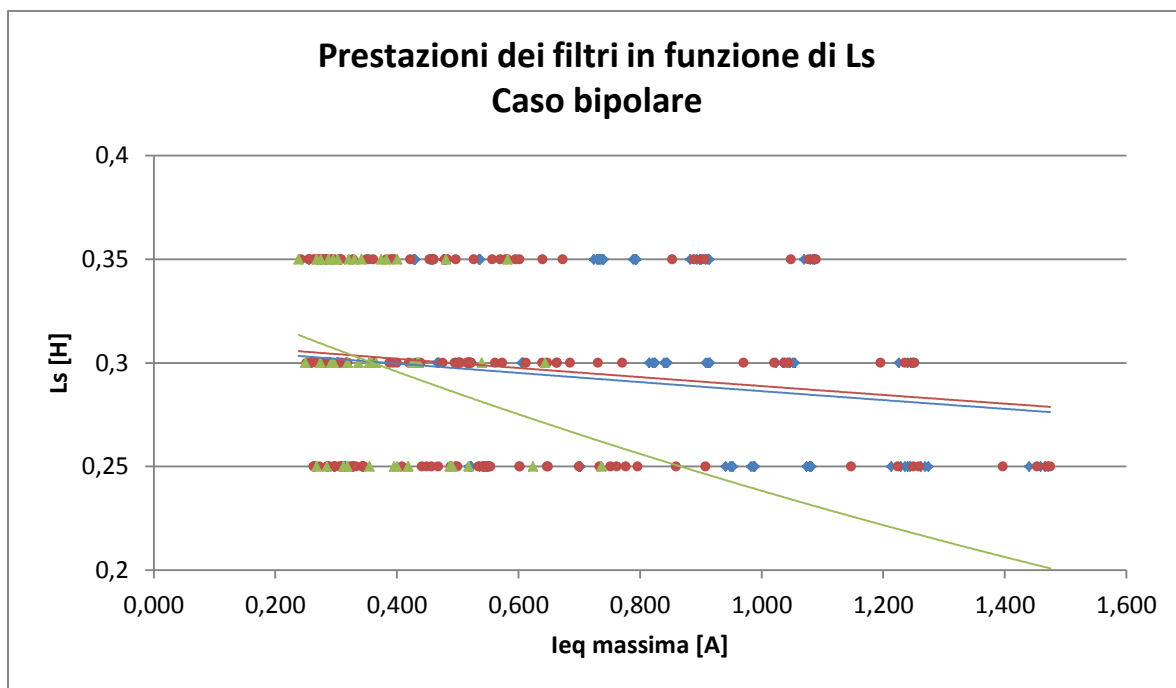


Grafico 29 - Valutazione dell'influenza di  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri - Caso bipolare

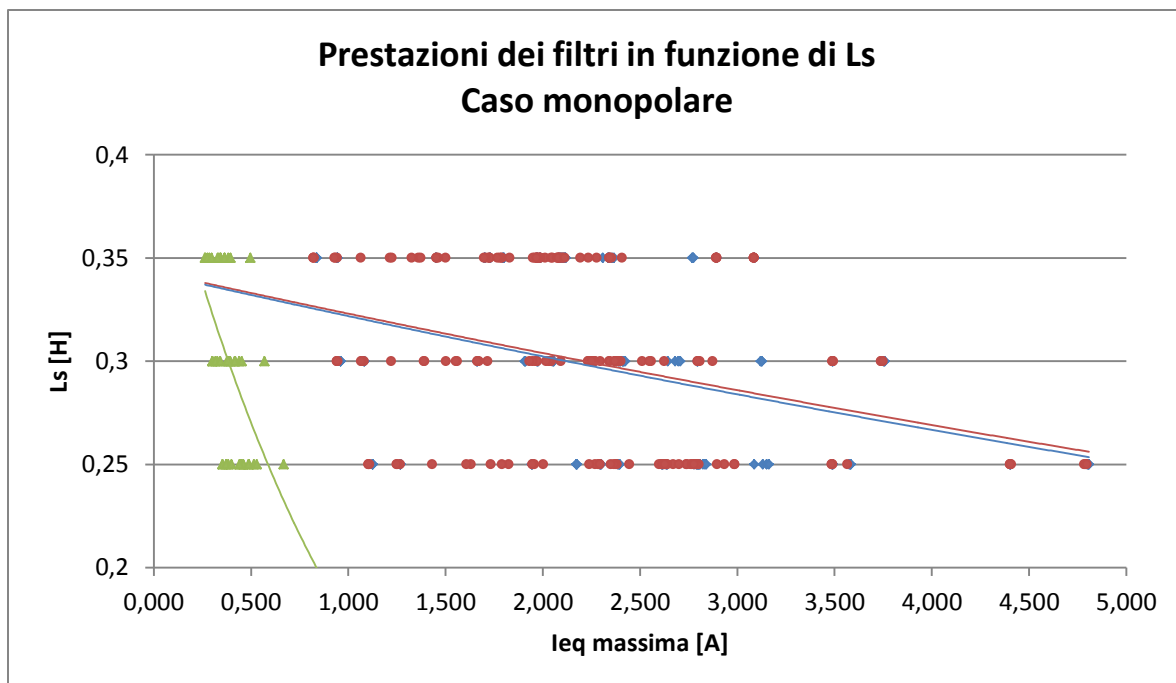


Grafico 30- Valutazione dell'influenza di  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri - Caso monopolare

Osservando i dati e la linea di tendenza si nota come – in entrambi i casi – le prestazioni migliorino all’aumentare dell’induttanza del reattore di spianamento, seppur in maniera non eccessivamente marcata. Le differenze più grandi si notano per i filtri ad accordo doppio (soprattutto nel funzionamento monopolare) e per i filtri ad accordo singolo aventi prestazioni non buone. Si sottolinea come non sia scontata l’equazione “induttanza maggiore del reattore di spianamento = corrente meno ondulata lato DC”, in quanto occorre tenere in considerazione l’interazione fra questa induttanza e gli elementi del circuito posto a valle (induttori e condensatori dei filtri, parametri elettrici della linea) a ciascuna frequenza.

### 5.6.2 Capacità principale del filtro

Il secondo fattore di cui è stata analizzata l’influenza è la capacità principale del filtro (si ricorda che la capacità principale di un filtro è quella sottoposta alla massima tensione, quindi con le notazioni introdotte nei paragrafi precedenti “C” per i filtri singoli e passa alto, e “C<sub>1\_d</sub>” per i filtri doppi). Dati e linee di tendenza sono rappresentati nei grafici seguenti.

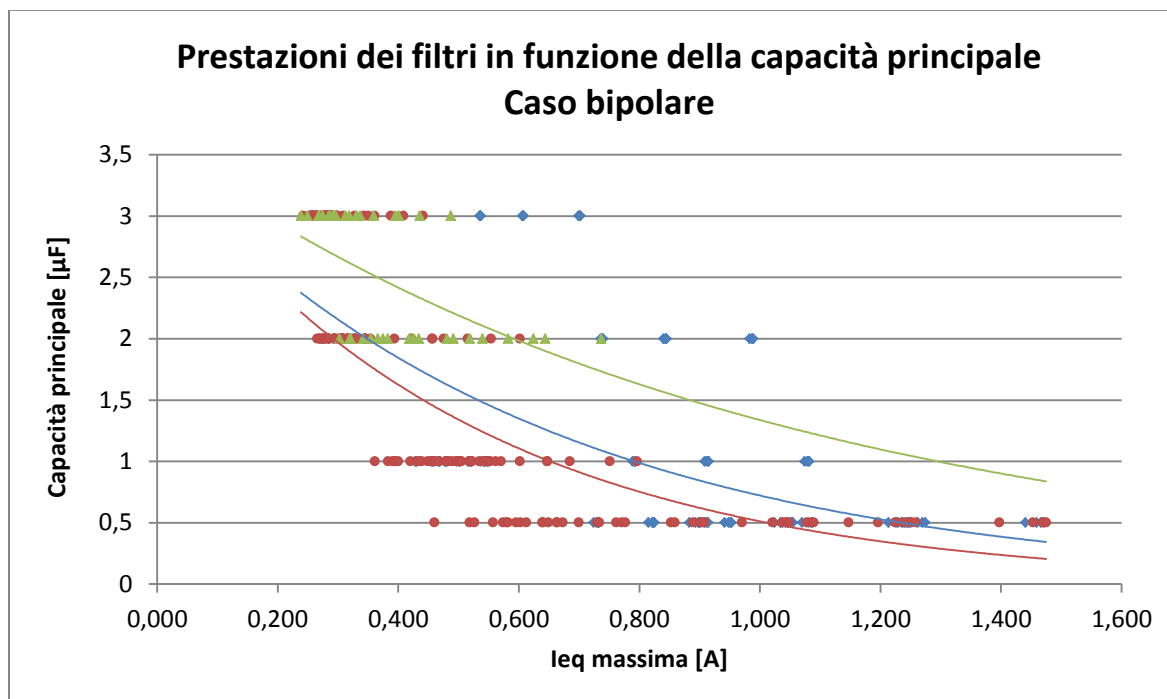


Grafico 31 - Valutazione dell’influenza della capacità principale del filtro sulle sue prestazioni - Caso bipolare

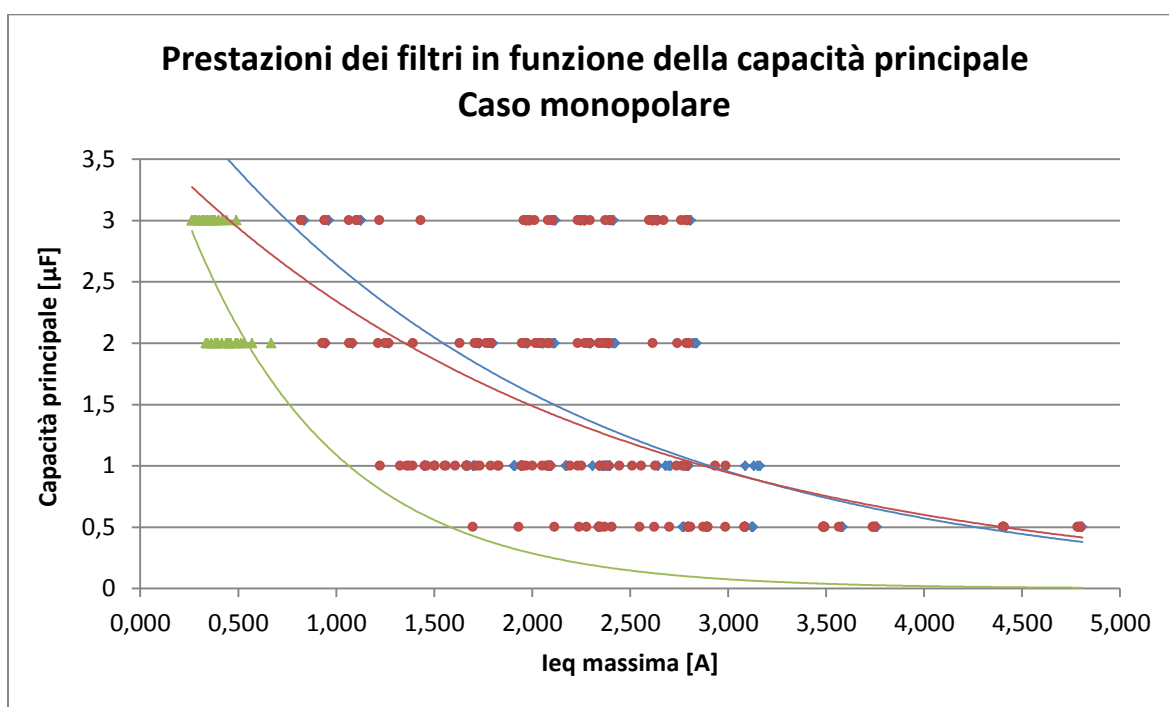


Grafico 32 - Valutazione dell'influenza della capacità principale del filtro sulle sue prestazioni - Caso monopolare

Osservando i dati si coglie come per ogni tipologia di filtro le prestazioni migliorino all'aumentare della taglia del condensatore principale, in particolar modo nel funzionamento monopolare. Essendo il costo dei condensatori maggiore all'aumentare della taglia (ovviamente a parità di tensione e di tutti gli altri parametri caratteristici) occorrerà trovare un compromesso fra costi e prestazioni del sistema di filtraggio.

### 5.6.3 Ordine di risonanza dei filtri

Si passa ora all'analisi dell'influenza della frequenza di accordo dei filtri sulle prestazioni dei filtri stessi. Si ricorda quanto segue:

- per i filtri singoli (smorzati e non) la frequenza di risonanza varia assumendo i valori: 12,24,36,48;
- i filtri doppi sono stati accordati alle frequenze in corrispondenza delle quali i filtri singoli avevano le prestazioni armoniche migliori, quindi stabilmente alla dodicesima e la ventiquattresima.

Come ovvio, per i filtri doppi sono state rappresentate nei grafici seguenti entrambe le frequenze di accordo.

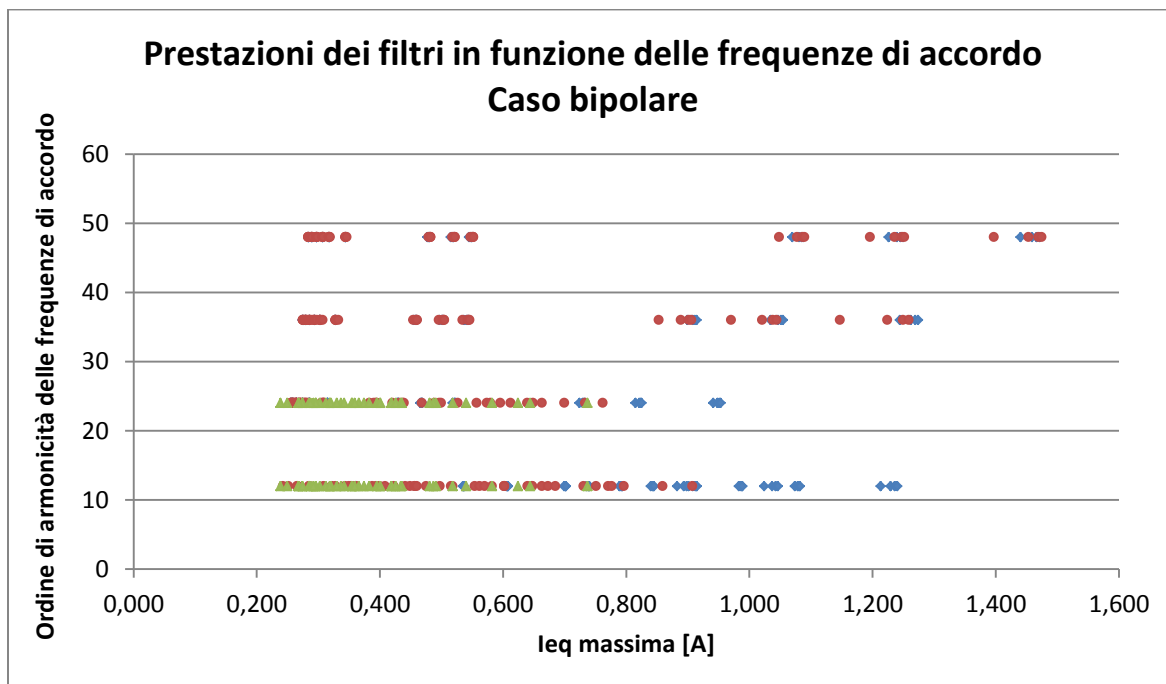


Grafico 33 - Valutazione dell'influenza delle frequenze di accordo dei filtri sulle loro prestazioni - Caso bipolare

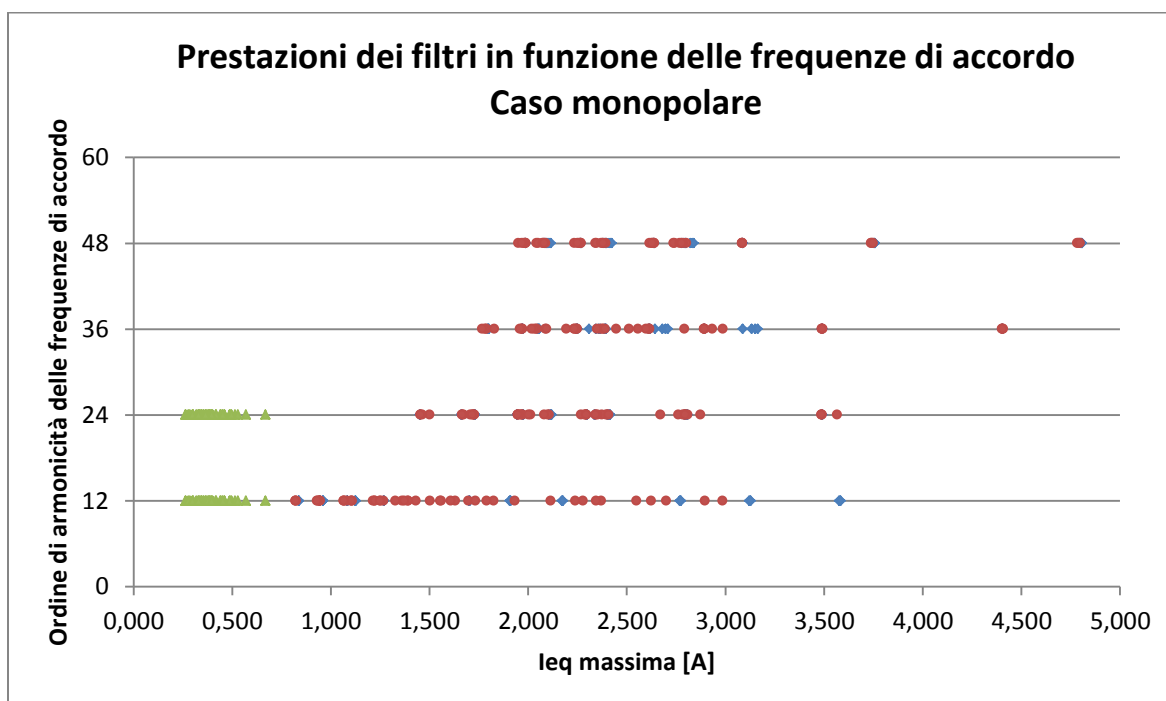


Grafico 34 - Valutazione dell'influenza delle frequenze di accordo dei filtri sulle loro prestazioni - Caso monopolare

Si notano qui degli andamenti facilmente prevedibili:

- Nel funzionamento bipolare, le correnti di modo comune circolanti non sono quelle alle armoniche caratteristiche, quindi i filtri analizzati non sono accordati ad ordini di armonicità presenti nello spettro delle correnti. Hanno le prestazioni migliori quei filtri che riescono a drenare meglio le correnti di ampiezza maggiore, che come si nota dal grafico seguente (che mostra per il solo caso bipolare quali siano le armoniche più disturbanti, valutazione effettuata procedendo nella medesima maniera di quanto fatto al paragrafo 5.2.2.1) sono concentrate nell'intervallo di frequenze [800-1500] Hz<sup>58</sup>.

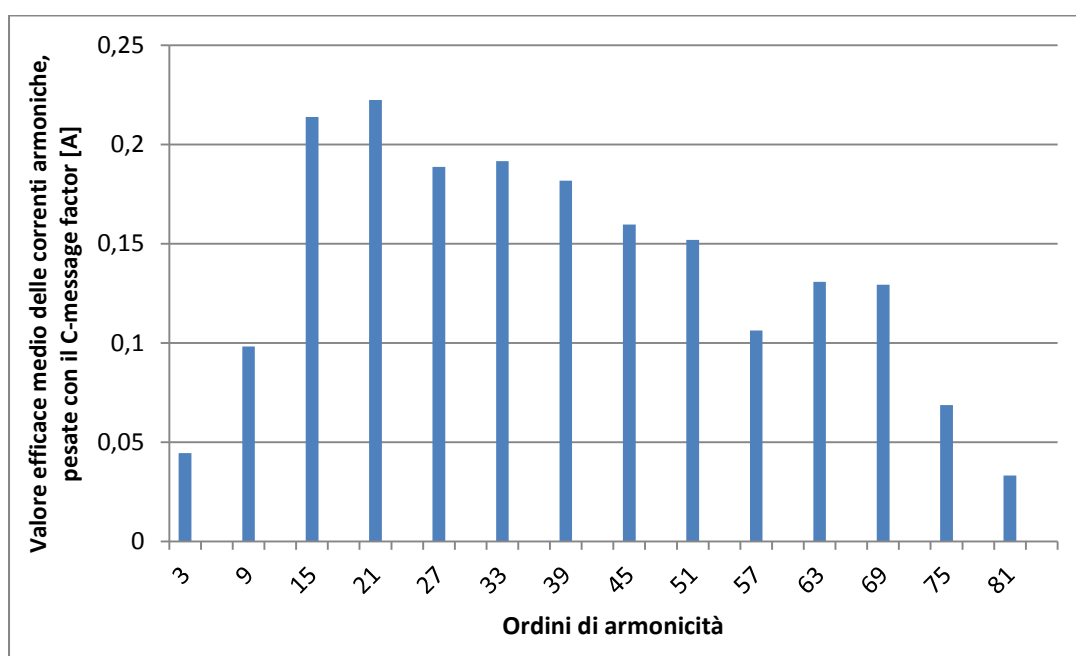


Grafico 35 - Valutazione delle armoniche più disturbanti nel funzionamento bipolare

Saranno tendenzialmente migliori quindi nel caso bipolare i filtri accordati alla ventiquattresima armonica. In ogni caso non vi sono differenze sostanziali tra le prestazioni dei filtri in funzione delle frequenze di accordo, così come non vi sono picchi particolari nello spettro riportato nel Grafico 35: anche cancellare completamente una componente (cosa che per altro non si può fare con le

<sup>58</sup> Si ricorda che questo range era quello per il quale il C-message factor assumeva i valori maggiori.

frequenze di accordo utilizzate) non porterebbe vantaggi sostanziali in quanto vi sono molte armoniche di ampiezza paragonabile. Come si vedrà in seguito, più che la frequenza di accordo sarà la tipologia di filtro il parametro fortemente influenzante le prestazioni dei filtri nel caso bipolare.

- Nel funzionamento monopolare, invece, le correnti alle armoniche caratteristiche hanno un ruolo preponderante nella composizione della corrente perturbata equivalente: le prestazioni migliori si hanno con filtri in grado di ridurre sensibilmente le armoniche caratteristiche più “pesanti”, quindi quelle di ordine inferiore, la dodicesima e la ventiquattresima.

#### 5.6.4 Tipologia di filtro

Si analizzano in questo paragrafo le prestazioni dei filtri in funzione della loro tipologia.

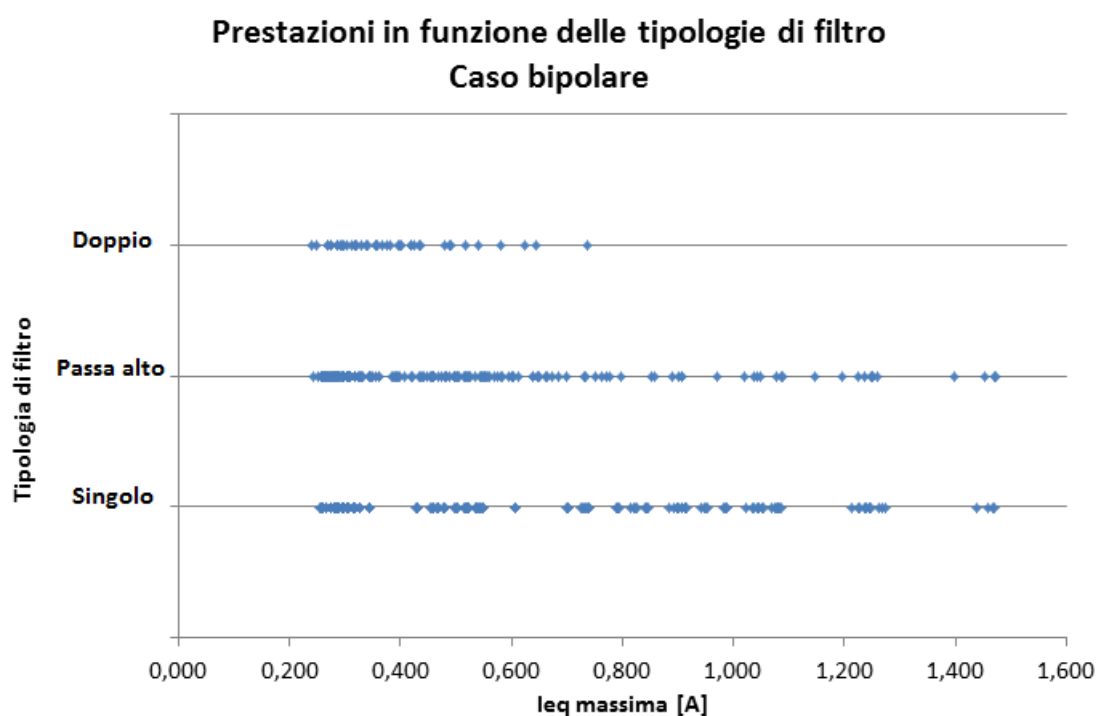


Grafico 36 - Prestazioni dei filtri in funzione della loro tipologia - Caso bipolare

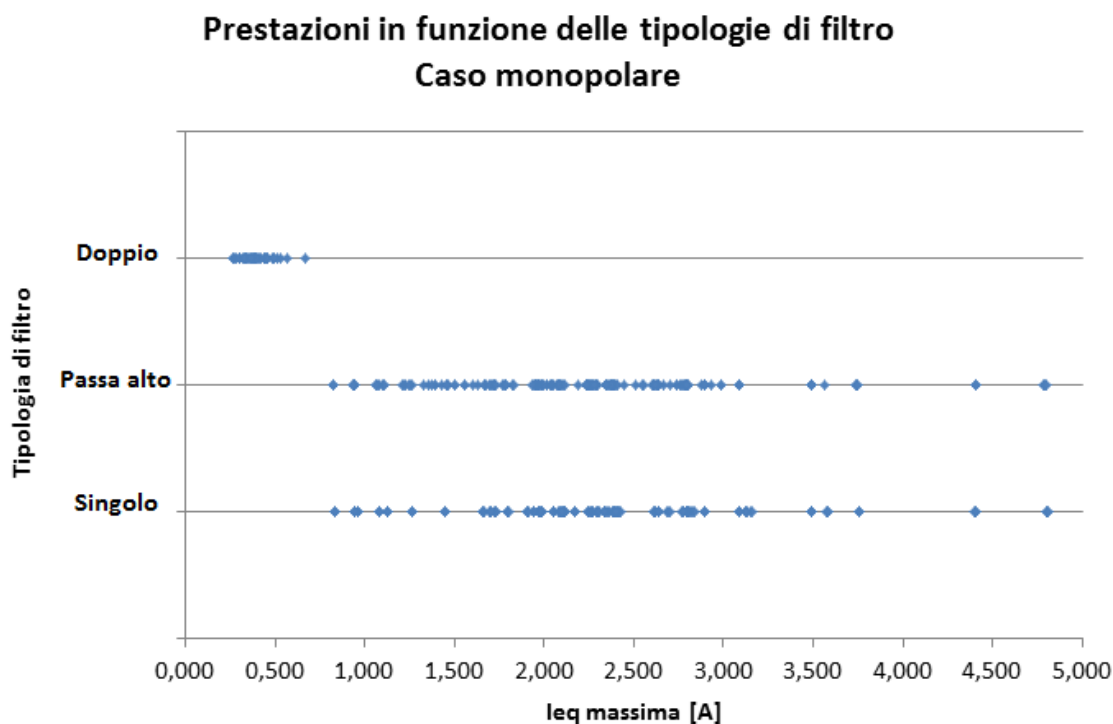


Grafico 37 - Prestazioni dei filtri in funzione della loro tipologia - Caso monopolare

Basandosi sui grafici 36 e 37 si possono fare le seguenti considerazioni:

- I filtri doppi hanno prestazioni molto migliori rispetto alle altre tipologie di filtri nel funzionamento monopolare, mentre nel funzionamento bipolare essi hanno prestazioni paragonabili ai filtri singoli. Questo fatto era prevedibile, ricordando il fatto che essi sostanzialmente annullano il contributo di due armoniche che da sole costituiscono la maggior parte del contributo alla corrente perturbata equivalente nel caso monopolare, armoniche che nel funzionamento bipolare non hanno ruolo in quanto prive di comportamento di modo comune. Nel funzionamento bipolare il ruolo dei filtri è quello di drenare nella maniera migliore possibile un numero alto di armoniche: il vantaggio di avere un filtro doppio in questo caso rispetto ad uno singolo diminuisce sensibilmente.
- Per quanto riguarda i filtri con una sola frequenza di accordo (singoli e singoli smorzati), si può notare come le prestazioni dei filtri passa alto siano migliori soprattutto nel funzionamento bipolare. La spiegazione a questo fatto risiede in quanto detto precedentemente: i filtri smorzati, avendo un'impedenza poco

variabile su un intervallo di frequenze ampio, riescono a filtrare più componenti di corrente di quante non faccia un filtro ad accordo singolo non smorzato. Questo è un vantaggio considerevole nei casi di spettri pressoché uniformi (funzionamento bipolare), mentre si ha sostanzialmente una compensazione fra questo filtraggio ad ampio spettro consentito dal passa alto e il maggiore drenaggio di corrente alla frequenza di risonanza garantito dai filtri ad accordo singolo nel caso di spettri aventi dei picchi considerevoli (si pensi alle armoniche caratteristiche di basso ordine nel funzionamento monopolare).

### 5.6.5 Fattore di qualità

Prima di poter analizzare l'influenza del fattore di qualità sulle prestazioni dei filtri, occorre definire cosa si intende per fattore di qualità del filtro ad accordo doppio. Si ricorda che il parametro resistivo per questa tipologia di filtro non è stato trovato dopo aver imposto un valore al fattore di qualità come si era fatto per le altre tipologie di filtro, bensì appoggiandosi ai filtri ad accordo singolo ed assegnando al parametro  $R_d$  un valore tale da minimizzare le differenze relative fra le impedenze dei filtri ad accordo singolo in parallelo e quella del filtro doppio nei punti di massimo e minimo locale (frequenze di risonanza e picco fra esse compreso).

Per un filtro doppio, il fattore di qualità coincide con il fattore di qualità del parallelo di  $L_{2\_d}$  e  $R_d$  alla frequenza media geometrica fra le frequenze di accordo del filtro<sup>59</sup>. Dette  $f_1$  ed  $f_2$  le frequenze di risonanza del filtro doppio si ha quindi:

$$f_m = \sqrt{f_1 f_2} \quad (5.12)$$

$$QF = \frac{R_d}{L_{2\_d} * 2\pi f_m} \quad (5.13)$$

---

<sup>59</sup> Fonte: Three Phase Harmonic Filter. Implement four types of three-phase harmonic filters using RLC components. <http://www.mathworks.it/help/phymod/sps/powersys/ref/threephaseharmonicfilter.html>



Si riportano in forma tabellare i fattori di qualità dei filtri ad accordo doppio considerati e, a seguire, i grafici riferiti al funzionamento bipolare e monopolare.

$C_{1d}$ [ $\mu\text{F}$ ]	$C_{2d}$ [ $\mu\text{F}$ ]	$L_{1d}$ [mH]	$L_{2d}$ [mH]	$R_d$ [ $\Omega$ ]	QF
3	24,1	6,90	2,48	405	31
2	16,1	10,35	3,73	608	31
3	15,3	7,57	3,57	631	33
3	10,9	8,38	4,52	854	35
2	10,2	11,35	5,36	947	33
3	8,3	9,38	5,28	1064	38
3	6,7	10,66	5,76	1243	41
2	7,3	12,56	6,78	1281	35
3	5,3	14,66	5,28	1317	47
3	5,7	12,34	5,83	1353	44
2	5,6	14,07	7,92	1596	38
2	4,5	15,99	8,64	1865	41
2	3,6	21,99	7,92	1975	47
2	3,8	18,52	8,75	2030	44

Tabella 34 - Valori del fattore di qualità dei filtri doppi

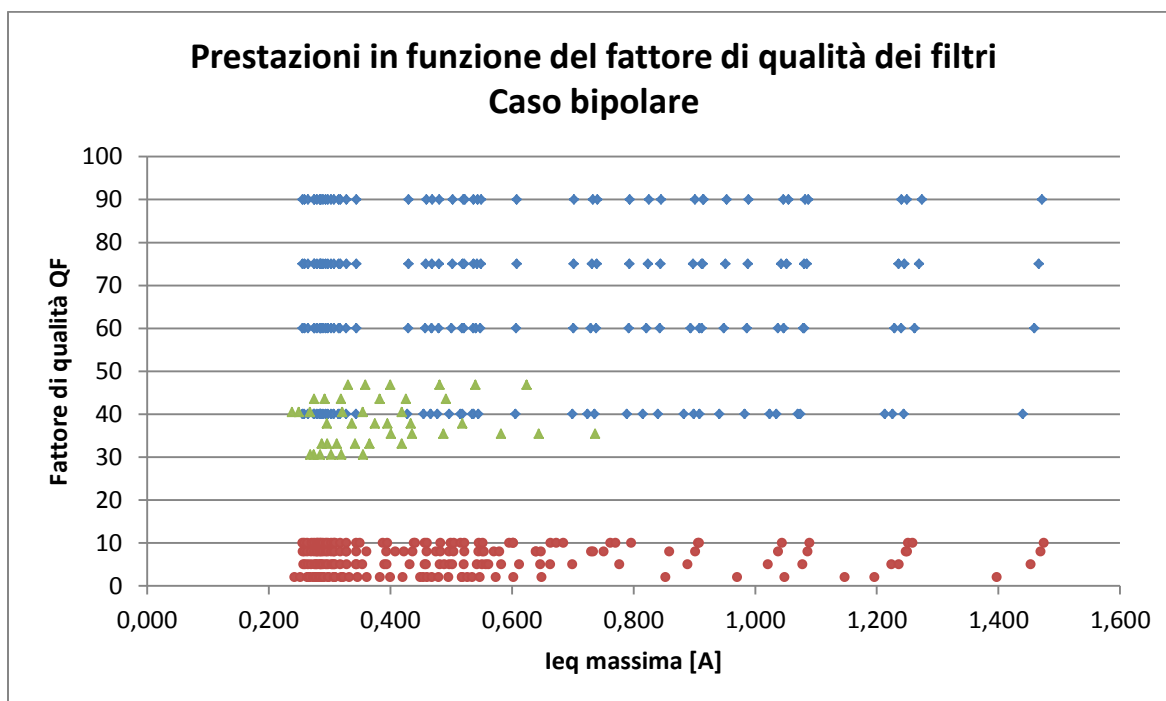


Grafico 38 - Prestazioni dei filtri in funzione del loro fattore di qualità - Caso bipolare

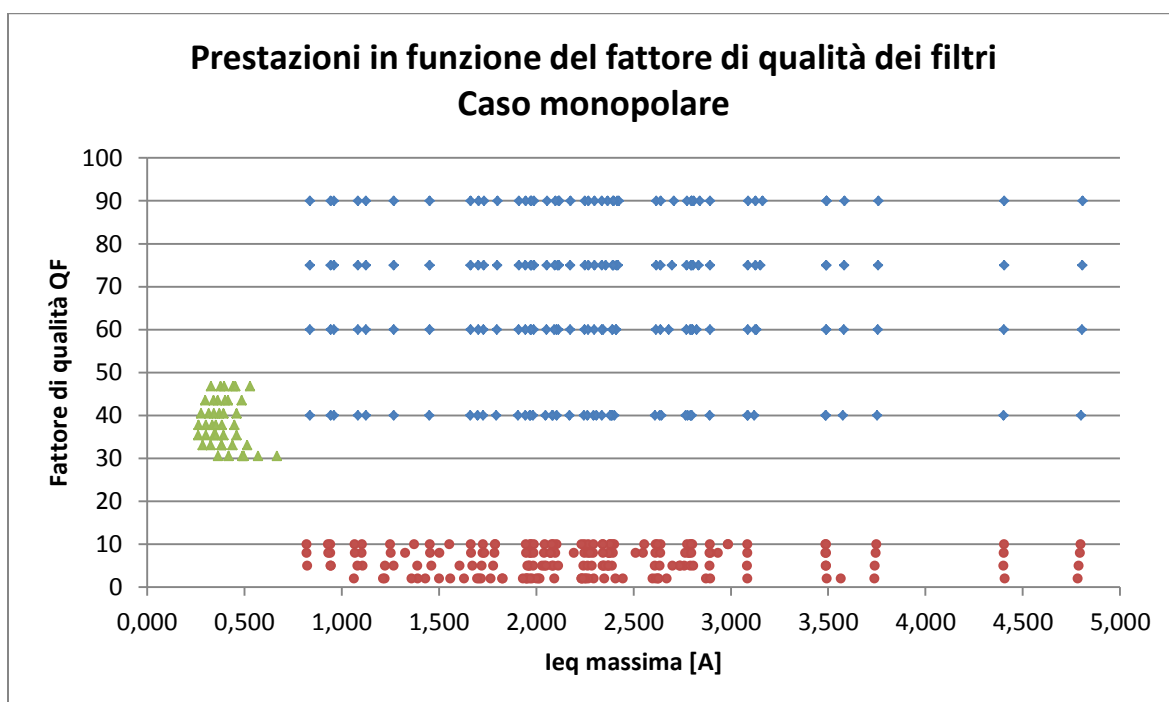


Grafico 39 - Prestazioni dei filtri in funzione del loro fattore di qualità - Caso monopolare

In entrambe le condizioni di funzionamento non si è in grado di identificare una regolarità nelle prestazioni in funzione del fattore di qualità. Nel caso monopolare, sembrerebbe che le prestazioni migliori si abbiano per valori di QF compresi fra 35 e 45; in realtà, questa è una mera coincidenza dovuta al fatto che i filtri doppi analizzati presentavano quei valori del fattore di qualità: ad influenzare le prestazioni è la tipologia di filtro, non il fattore di qualità.

### 5.6.6 Considerazioni conclusive

Confrontando i risultati ottenuti nei paragrafi precedenti si può affermare quanto segue:

- Il parametro che più influenza le prestazioni dei filtri è la tipologia del filtro stesso: i filtri ad accordo doppio hanno prestazioni (specie nel funzionamento monopolare, già evidenziato come il più critico) migliori rispetto ai filtri ad accordo singolo, siano essi smorzati oppure no.

- 
- Il secondo fattore in ordine di importanza è la frequenza di risonanza del filtro: anche in questo caso le maggiori differenze emergono nel funzionamento monopolare. A riprova di quanto detto, negli impianti HVDC di cui sono disponibili informazioni in rete tra le frequenze di accordo dei filtri lato continua vi sono sempre la dodicesima e la ventiquattresima armonica [17,19,23].
  - Anche il valore della capacità principale del filtro assume un ruolo rilevante: maggiore essa è, migliori sono le performance del sistema di filtraggio. Non essendo pensabile per motivazioni soprattutto economiche aumentare eccessivamente questo valore, esistono dei valori standard (che sono grossomodo quelli utilizzati in questo lavoro) sopra ai quali generalmente non ci si spinge. La scelta del valore di capacità è da farsi considerando entrambi gli aspetti, prestazionali (che spingono verso capacità alte) ed economici (che almeno per quanto riguarda il costo del componente condensatore tenderebbero a ridurre il valore di capacità).
  - Gli altri parametri assumono un'influenza meno marcata nei confronti delle prestazioni del sistema di filtraggio delle armoniche lato DC, in particolar modo il fattore di qualità del filtro. Per quanto riguarda l'induttore di spianamento, le prestazioni nei casi qui analizzati migliorano all'aumentare della taglia, ma in maniera meno significativa rispetto ai tre fattori principali (tipologia di filtro, frequenze di accordo e valore della capacità principale).

### **5.6.7 Analisi sull'influenza contemporanea dei parametri C ed Ls**

Come ulteriore, conclusiva analisi, si è provata a valutare quale influenza avessero – insieme – due dei parametri che più sono apparsi importanti nel determinare le prestazioni dei filtri, ossia la capacità principale e l'induttanza del reattore di spianamento. L'importanza di questa analisi risiede anche nel fatto che questi parametri sono connessi ad elementi che hanno un impatto rilevante sul costo complessivo del sistema di filtraggio. Si sono realizzati sei grafici tridimensionali (per ciascuna configurazione dell'impianto e per ciascuna tipologia di filtro) che riportano sugli assi x ed y i valori di capacità principale e induttanza del reattore di spianamento, e sull'asse z il valore della massima  $I_{eq}$  misurata.

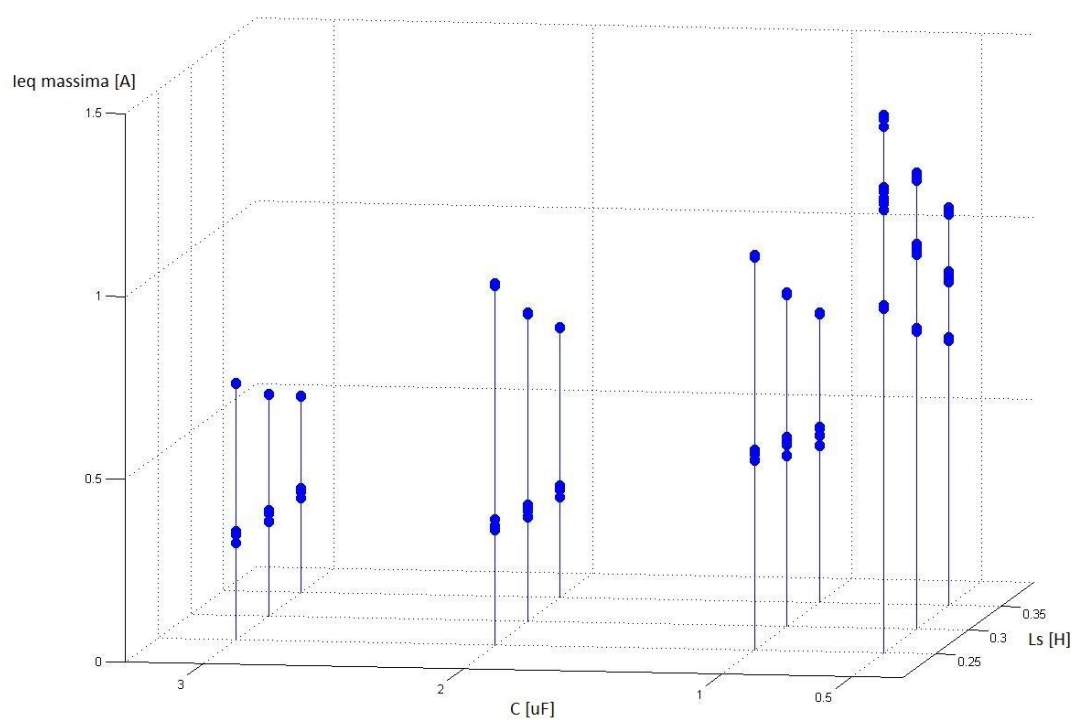


Grafico 40 - Influenza dei parametri  $C$  e  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri ad accordo singolo - Funzionamento bipolare

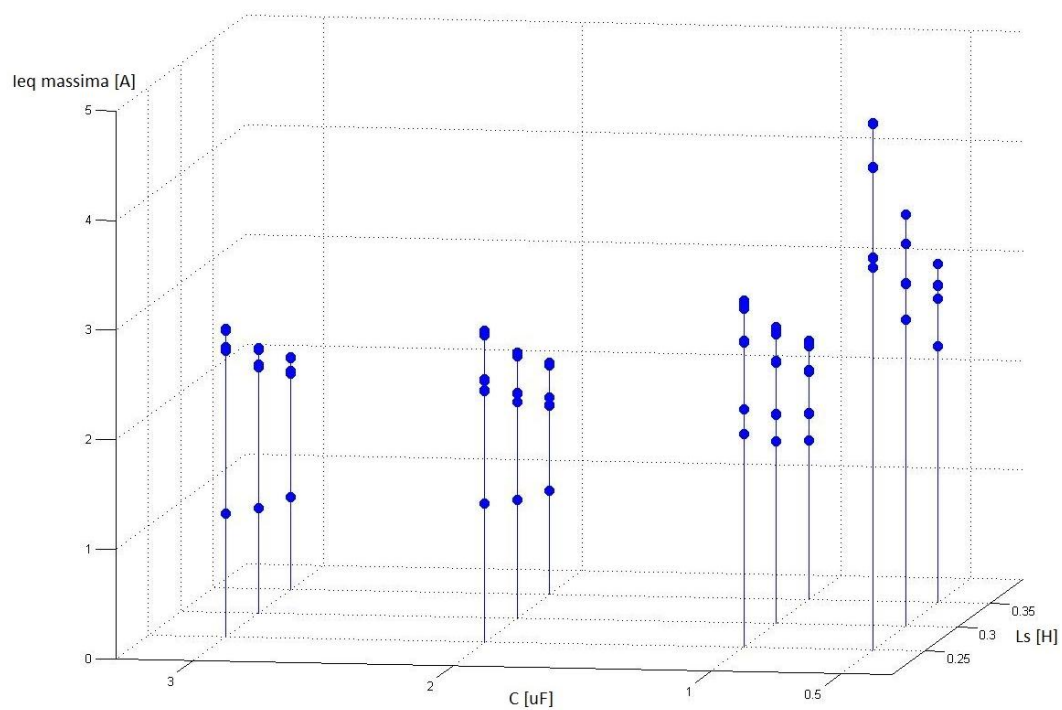
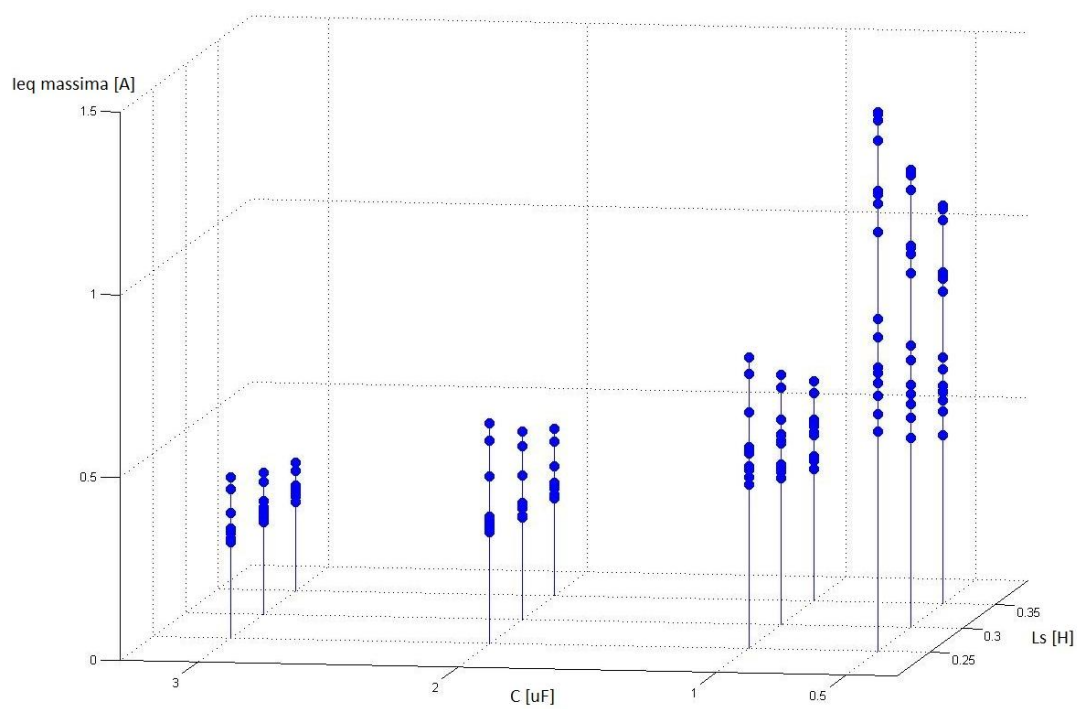
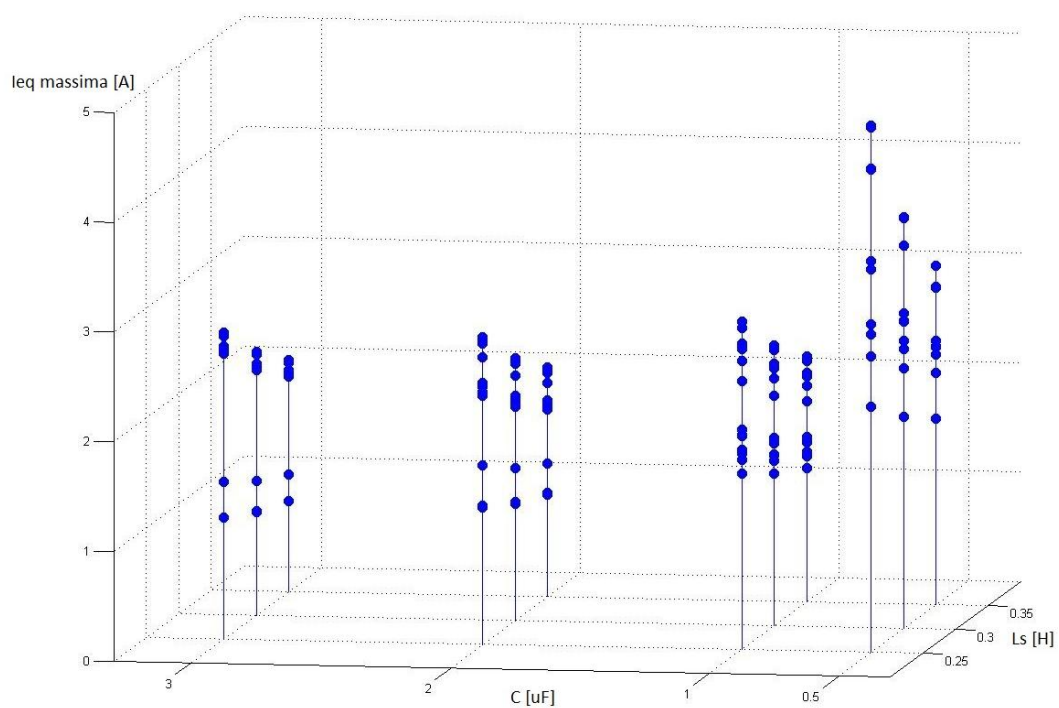


Grafico 41 - Influenza dei parametri  $C$  e  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri ad accordo singolo - Funzionamento monopolare

Grafico 42 - Influenza dei parametri C e  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri passa alto - Funzionamento bipolareGrafico 43 - Influenza dei parametri C e  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri passa alto - Funzionamento monopolare

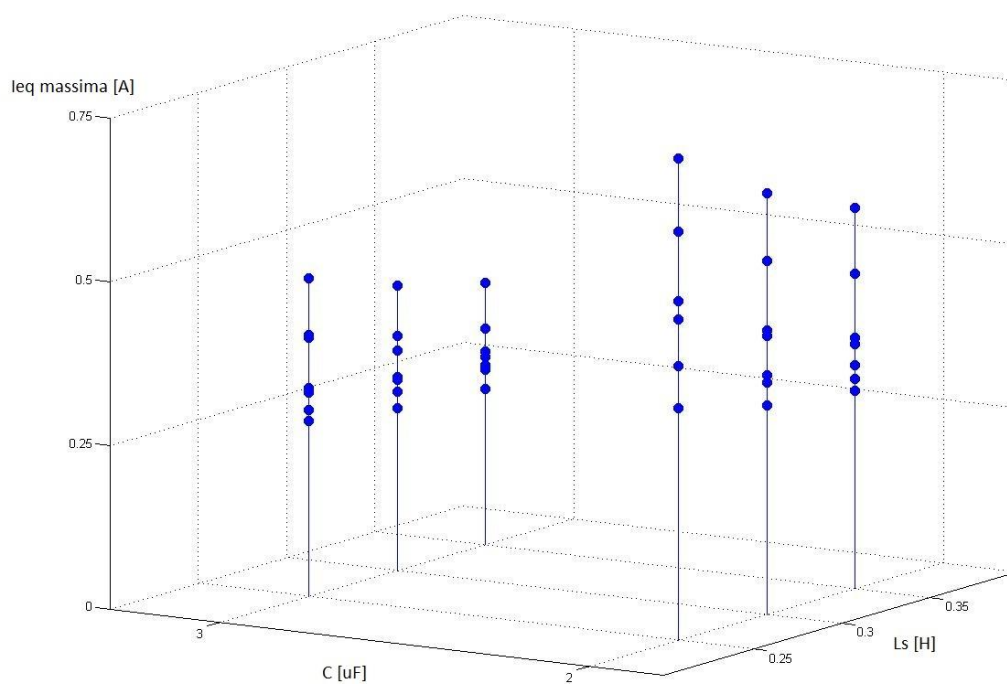


Grafico 44 - Influenza dei parametri  $C_{1,d}$  e  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri ad accordo doppio – Funzionamento bipolare

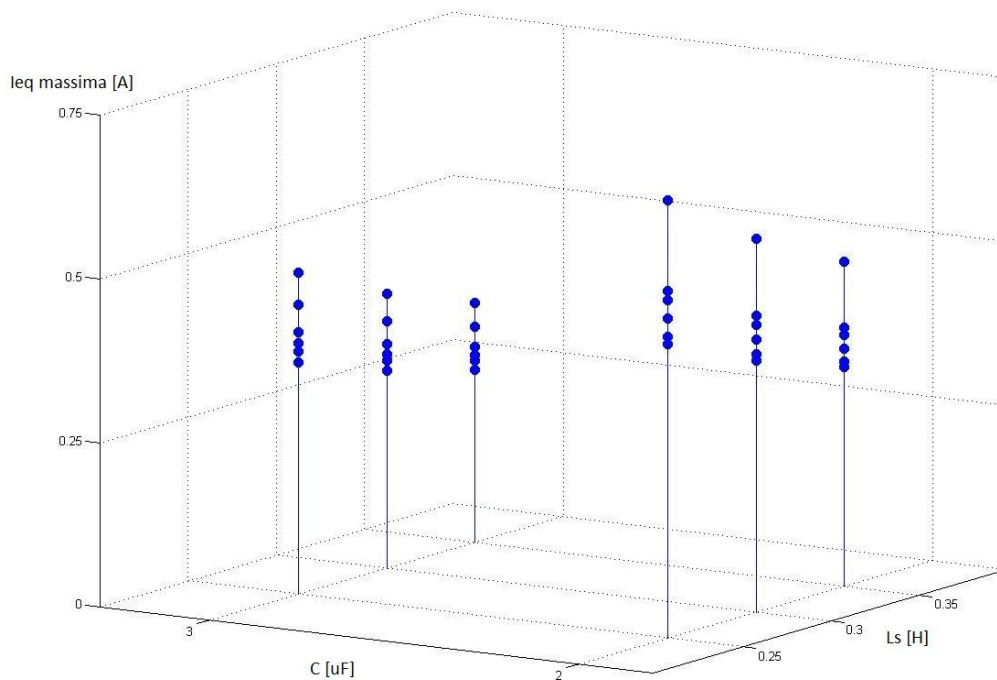


Grafico 45 - Influenza dei parametri  $C_{1,d}$  e  $L_s$  sulle prestazioni dei filtri ad accordo doppio – Funzionamento monopolare

---

Si evidenzia ancora una volta come le prestazioni armoniche dei filtri migliorino all'aumentare dei due parametri capacità principale e induttanza del reattore di spianamento; questo comportamento è molto marcato specie per i filtri passa alto e ad accordo doppio. Si può anche notare come - a parità di valore di capacità - l'influenza del reattore di spianamento sulle prestazioni sia più forte nel funzionamento monopolare rispetto a quello bipolare.

## 5.7 Scelta dei filtri da installare

Giunti a questo punto del lavoro si ha a disposizione una serie di filtri le cui prestazioni soddisfano i requisiti armonici di fascia 1. Si ricorda che i requisiti armonici imposti per l'impianto oggetto di studio sono i seguenti (si veda a proposito il paragrafo 5.2.1):

- $I_{eq\_lim} = 500$  mA nel funzionamento bipolare
- $I_{eq\_lim} = 1$  A nel funzionamento monopolare con ritorno metallico

La tabella seguente riporta in forma sintetica i valori dei parametri circuitali e delle correnti perturbate equivalenti massime dei 45 filtri “accettabili”. Si è qui scelto di ordinare i filtri a seconda di quanto margine fosse da essi garantito – mediamente nelle due condizioni di funzionamento – fra massima corrente perturbata equivalente e  $I_{eq}$  limite. Sono migliori i filtri che lasciano molto margine fra corrente misurata e corrente limite accettabile. L'ultima colonna (denominata “numero filtro”) introduce un codice alfanumerico, che verrà utilizzato d'ora in avanti per indicare in maniera sintetica e comoda lo specifico filtro cui si riferisce.

Osservando l'ordinamento dei dati si ritrova quanto più volte già evidenziato riguardo il fatto che i filtri doppi hanno prestazioni migliori dei filtri passa alto.

Tipologia filtro	$L_s$ [mH]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]	C1 d [ $\mu$ F]	C2 d [ $\mu$ F]	L1 d [mH]	L2 d [mH]	Rd [ $\Omega$ ]	$I_{eq,max}$ monopolare [A]	$I_{eq,max}$ bipolare [A]	Numero filtro
Doppio	350	X	X	X	3	6,7	10,7	5,8	1243	0,277	0,238	D1
Doppio	300	X	X	X	3	6,7	10,7	5,8	1243	0,317	0,249	D2
Doppio	350	X	X	X	3	5,7	12,3	5,8	1353	0,298	0,275	D3
Doppio	350	X	X	X	3	8,3	9,4	5,3	1064	0,264	0,296	D4
Doppio	350	X	X	X	3	15,3	7,6	3,6	631	0,286	0,287	D5
Doppio	350	X	X	X	3	24,1	6,9	2,5	405	0,365	0,268	D6
Doppio	250	X	X	X	3	6,7	10,7	5,8	1243	0,371	0,268	D7
Doppio	300	X	X	X	3	15,3	7,6	3,6	631	0,327	0,296	D8
Doppio	300	X	X	X	3	5,7	12,3	5,8	1353	0,342	0,292	D9
Doppio	300	X	X	X	3	24,1	6,9	2,5	405	0,419	0,274	D10
Doppio	300	X	X	X	3	8,3	9,4	5,3	1064	0,302	0,337	D11
Doppio	350	X	X	X	2	4,5	16,0	8,6	1865	0,343	0,321	D12
Doppio	350	X	X	X	3	5,3	14,7	5,3	1317	0,329	0,330	D13
Doppio	250	X	X	X	3	15,3	7,6	3,6	631	0,383	0,312	D14
Doppio	250	X	X	X	3	5,7	12,3	5,8	1353	0,400	0,319	D15
Doppio	250	X	X	X	3	24,1	6,9	2,5	405	0,490	0,285	D16
Doppio	350	X	X	X	3	10,9	8,4	4,5	854	0,263	0,401	D17
Doppio	350	X	X	X	2	10,2	11,3	5,4	947	0,383	0,342	D18
Doppio	350	X	X	X	2	5,6	14,1	7,9	1596	0,335	0,374	D19
Doppio	300	X	X	X	3	5,3	14,7	5,3	1317	0,377	0,359	D20
Doppio	350	X	X	X	2	16,1	10,3	3,7	608	0,496	0,302	D21
Doppio	300	X	X	X	2	4,5	16,0	8,6	1865	0,393	0,354	D22
Doppio	350	X	X	X	2	3,8	18,5	8,7	2030	0,363	0,383	D23
Doppio	250	X	X	X	3	8,3	9,4	5,3	1064	0,354	0,395	D24
Doppio	300	X	X	X	2	10,2	11,3	5,4	947	0,439	0,366	D25
Doppio	300	X	X	X	3	10,9	8,4	4,5	854	0,301	0,436	D26
Doppio	300	X	X	X	2	16,1	10,3	3,7	608	0,570	0,319	D27
Doppio	250	X	X	X	3	5,3	14,7	5,3	1317	0,442	0,400	D28
Doppio	300	X	X	X	2	5,6	14,1	7,9	1596	0,384	0,434	D29
Doppio	300	X	X	X	2	3,8	18,5	8,7	2030	0,416	0,426	D30



Doppio	250	X	X	X	2	4,5	16,0	8,6	1865	0,460	0,419	D31
Doppio	250	X	X	X	3	10,9	8,4	4,5	854	0,353	0,487	D32
Doppio	250	X	X	X	2	10,2	11,3	5,4	947	0,515	0,419	D33
Doppio	350	X	X	X	2	3,6	22,0	7,9	1975	0,395	0,481	D34
Doppio	250	X	X	X	2	16,1	10,3	3,7	608	0,668	0,355	D35
Passa alto	350	3	23,45	442	X	X	X	X	X	0,824	0,286	PA1
Doppio	250	X	X	X	2	3,8	18,5	8,7	2030	0,487	0,491	D36
Passa alto	350	3	23,45	707	X	X	X	X	X	0,820	0,328	PA2
Passa alto	350	3	23,45	884	X	X	X	X	X	0,821	0,350	PA3
Passa alto	300	3	23,45	442	X	X	X	X	X	0,946	0,309	PA4
Passa alto	350	2	35,18	663	X	X	X	X	X	0,943	0,354	PA5
Passa alto	300	3	23,45	707	X	X	X	X	X	0,942	0,361	PA6
Passa alto	300	3	23,45	884	X	X	X	X	X	0,942	0,388	PA7
Passa alto	350	2	35,18	1061	X	X	X	X	X	0,932	0,422	PA8
Passa alto	350	2	35,18	1326	X	X	X	X	X	0,930	0,457	PA9

Tabella 35 - Elenco riassuntivo dei filtri che rispettano i requisiti in fascia 1

---

La scelta di quale fra i filtri sopra elencati installare non è una cosa semplice, non ci si può semplicemente basare sull'ordinamento introdotto nella Tabella 35.

La modalità di scelta più corretta del sistema di filtraggio lato DC (tra quelli che ovviamente rispettano i requisiti armonici) passa da una valutazione economica. Scopo dell'analisi è quello di valutare, su un orizzonte temporale pari alla vita utile dell'impianto<sup>60</sup>, quale fra le configurazioni dei filtri che rispettano i requisiti comporti un esborso economico minore per il proprietario del collegamento HVDC.

Gli aspetti da tenere in considerazione per effettuare una valutazione economica completa sono:

- I costi fissi per l'acquisto e l'installazione dei componenti del filtro;
- I costi legati alla manutenzione dei componenti stessi;
- I costi variabili connessi con il valore dell'energia persa, da attualizzarsi mediante le formule abitualmente utilizzate in ambito economico per la valutazione degli investimenti.

Per quanto riguarda i costi fissi, ci si è scontrati con l'impossibilità di reperire dati riguardo l'esborso connesso con l'acquisto dei diversi componenti: non esistono data sheet ne tanto meno listini prezzi per le parti di un impianto HVDC, esse spesso vengono realizzate su misura per ciascun specifico impianto, e in ogni caso i produttori non rendono pubblici (se non all'acquirente) i costi dei singoli elementi. Qualitativamente, si può dire che l'elemento più costoso di un filtro è il condensatore principale, e il senso comune suggerisce che il costo cresca - a parità degli altri parametri caratteristici - con l'aumentare della sua capacità. Non vi sono però a disposizione dati quantitativi, né esatti né indicativi, riguardo i costi dei componenti dei filtri, così come dei reattori di spianamento o degli altri elementi costituenti l'impianto (valvole<sup>61</sup> ecc).

Per quanto riguarda i costi variabili, abbiamo detto che essi sono connessi con le perdite dell'impianto. Nella tabella seguente sono riportate le potenze complessivamente perse dai

---

<sup>60</sup> Generalmente, quando si parla di impianti di trasmissione di energia elettrica si ipotizza una vita utile di venti o più spesso di trenta anni.

<sup>61</sup> Si parla qui delle valvole poiché la loro scelta dipende dalle correnti che in esse devono circolare, ed queste correnti sono connesse anche con la scelta dei filtri lato corrente continua.

filtri della Tabella 35 installati nelle due stazioni di conversione per le diverse condizioni di funzionamento: l'ordinamento è qui effettuato per valori crescenti di potenza persa nella configurazione che sarà presumibilmente la più comune durante la vita utile dell'impianto (quindi il funzionamento bipolare con potenza trasmessa pari alla nominale). Si nota come i primi 23 filtri in questo ordinamento (quindi i filtri che presentano perdite interne inferiori) sono filtri ad accordo doppio.

Filtro	FUNZIONAMENTO BIPOLARE				FUNZIONAMENTO MONOPOLARE			
	P=300 MW	P=1200 MW	P=2100 MW	P=3000 MW	P=150 MW	P=600 MW	P=1050 MW	P=1500 MW
D13	2442	1203	949	2377	1228	603	472	1192
D3	2866	1361	871	2782	1446	687	436	1402
D20	3192	1576	1244	3123	1605	790	619	1566
D1	3434	1602	906	3327	1742	813	457	1687
D34	3527	1751	1381	3444	1793	883	689	1743
D9	3745	1783	1142	3656	1890	899	572	1843
D23	4100	1958	1264	3990	2101	999	637	2039
D4	4194	1936	1016	4058	2145	990	518	2075
D28	4347	2152	1702	4285	2186	1080	847	2149
D2	4488	2099	1189	4372	2277	1064	600	2217
D12	4849	2269	1298	4706	2514	1173	664	2435
D15	5101	2436	1564	5017	2575	1229	783	2529
D17	5243	2405	1204	5068	2718	1247	622	2627
D30	5358	2563	1657	5242	2746	1308	835	2679
D11	5481	2536	1333	5332	2803	1297	679	2727
D19	5818	2692	1428	5635	3065	1416	744	2966
D7	6113	2867	1627	5999	3102	1454	821	3043
D22	6336	2971	1703	6183	3285	1537	871	3200
D5	6769	3093	1501	6537	3596	1643	794	3473
D26	6852	3151	1579	6660	3553	1634	816	3453
D36	7298	3501	2269	7191	3741	1786	1143	3676
D24	7465	3465	1825	7317	3819	1772	930	3743
D29	7603	3525	1873	7404	4006	1855	976	3897
PA3	6166	4047	3777	7626	3186	1994	1775	3789
D31	8630	4058	2331	8482	4474	2099	1192	4391
D8	8846	4051	1969	8591	4700	2152	1043	4565
D18	8939	4089	1998	8637	4972	2272	1103	4802
PA2	7151	4614	4303	8708	3744	2319	2063	4404
D6	9138	4164	1980	8821	5079	2314	1096	4902
D32	9333	4304	2163	9138	4840	2232	1118	4739
PA7	8046	5273	4911	9977	4159	2599	2309	4961
PA9	8434	5771	5636	10921	4484	2861	2550	5409
PA1	9594	5939	5507	11200	5213	3126	2759	5939

D25	11683	5356	2622	11351	6498	2977	1447	6311
PA6	9331	6014	5599	11397	4888	3024	2686	5769
D21	11846	5402	2582	11438	6815	3106	1477	6578
D10	11947	5456	2599	11596	6641	3032	1439	6446
D14	12050	5535	2697	11790	6404	2941	1428	6266
PA8	9663	6513	6334	12266	5218	3294	2943	6226
PA4	12523	7751	7176	14678	6808	4082	3598	7787
D27	15495	7082	3391	15045	8912	4071	1939	8651
PA5	12752	8208	7916	15315	7092	4329	3864	8179
D33	15916	7318	3592	15578	8854	4068	1982	8662
D16	16281	7458	3561	15921	9052	4145	1973	8851
D35	21132	9688	4649	20673	12151	5567	2657	11883

Tabella 36 - Potenze perse [W] nelle diverse condizioni di funzionamento dai filtri aventi prestazioni conformi ai requisiti armonici di fascia 1

Se si intende procedere con la valutazione delle perdite elettriche non è sufficiente fermarsi a questo contributo: infatti la Tabella 36 riporta unicamente i valori delle potenze dissipate all'interno dei filtri. Esistono analisi [25] che mostrano come - rispetto a quelle nei filtri lato DC - siano molto più significative nel computo complessivo delle perdite di una stazione di conversione quelle localizzate nel reattore di spianamento e soprattutto nelle valvole costituenti il ponte<sup>62</sup>. Variando i filtri installati, si modificano i valori delle correnti circolanti in tutti i rami del circuito, e anche in valvole e reattore: di conseguenza anche le perdite varieranno. Di tutti questi elementi occorre tener conto nella valutazione dei costi connessi con la potenza persa e quindi nella scelta del sistema di filtraggio in continua migliore. Il programma scritto in ambiente Simulink al fine di valutare le prestazioni dei filtri è stato studiato in modo da avere a disposizione una serie di dati elettrici utilizzabili per valutare queste perdite: sono state misurate le correnti circolanti nei rami del modello a tre impulsi del convertitore e nei reattori di ciascuna stazione, in ciascuna condizione di funzionamento. Non si è potuta valutare la potenza persa complessiva – comprendendo anche le dissipazioni nelle valvole e nei reattori – in quanto non sono liberamente accessibili dati riguardanti gli aspetti costruttivi di questi elementi: quindi le correnti sono state valutate, ma mancano i dati di fabbrica per legarle alle perdite e procedere quindi alla scelta del filtro.

<sup>62</sup> Si parla anche di più di due ordini di grandezza di differenza.

## 6 CONCLUSIONI

In questo lavoro ci si è concentrati sul dimensionamento del sistema di filtraggio lato corrente continua di un impianto HVDC tradizionale (ossia con ponti costituiti da tiristori), utilizzando il criterio oggi universalmente adottato del contenimento dei disturbi indotti in linee di telecomunicazione adiacenti, quantificati mediante il parametro corrente perturbata equivalente.

Un primo, significativo risultato conseguito è stato quello di identificare e sviluppare un metodo avente validità generale, che segue un approccio che si può definire statistico, per assegnare un valore limite alla corrente perturbata equivalente: l'importanza di ciò risiede nel fatto che al momento non sono presenti in letteratura né indicazioni normative né semplicemente altri suggerimenti in tal senso, e la questione della definizione dei limiti armonici è lasciata ai singoli progettisti caso per caso, impianto per impianto.

La parte più corposa del lavoro è ruotata attorno allo sviluppo di un modello in ambiente Simulink con il quale – su un impianto che è stato dimensionato ad hoc e poi preso come riferimento – si sono valutate le prestazioni armoniche di 426 filtri appartenenti a tre differenti tipologie (filtri ad accordo singolo - smorzati e non - e filtri ad accordo doppio), identificando quali rispettassero i requisiti e quali invece no. Per ciascun filtro questa valutazione è stata condotta in otto diverse condizioni di funzionamento (ossia con quattro valori di potenza trasmessa per ciascuna delle configurazioni, bipolare e monopolare con ritorno metallico), comportando quindi un onere computazionale notevole. Per garantire una corretta valutazione delle componenti pulsanti sovrapposte alla corrente continua di polo – e quindi un corretto dimensionamento dei filtri – si sono rappresentati i convertitori elettronici di stazione mediante il cosiddetto *modello a tre impulsi*, che introducendo le capacità di dispersione verso terra consente di rappresentare esattamente tutte le armoniche di corrente presenti nel circuito.

Nella parte di analisi dei risultati ottenuti che ne è seguita si è identificato come siano soprattutto due i parametri aventi una marcata influenza sulle prestazioni complessive del sistema di filtraggio, ossia la capacità principale del filtro e l'induttanza del reattore di

spianamento, all'aumentare delle cui taglie migliorano le prestazioni armoniche. Questa informazione può assumere una grande rilevanza per un costruttore, per il quale è utile conoscere – anche per motivazioni economiche – quali siano gli elementi da dimensionare prioritariamente per quanto riguarda il sistema di filtraggio lato corrente continua.

Risultato ultimo di questa tesi è stato quello di aver ricavato una serie di dati elettrici (correnti circolanti nei reattori di spianamento e nei ponti, perdite nei filtri DC) per ciascun filtro e per ciascuna delle otto condizioni di funzionamento analizzate. Questa mole di dati può essere utilizzata - assieme ad altri elementi - da un costruttore (che ha una conoscenza completa delle caratteristiche dell'impianto) per la valutazione corretta delle perdite e dei costi ad esse connesse, e quindi per effettuare la scelta del sistema di filtraggio DC attraverso un'ottimizzazione economica completa. Non è stato possibile compierla in questo lavoro in quanto per la tipologia di impianto oggetto di studio (si ricorda come l'impianto di riferimento che si è utilizzato abbia una taglia considerevole, tensione di  $\pm 500$  kV e potenza trasmessa nominale di 3000 MW) non sono liberamente disponibili informazioni riguardo ai costi standard dei componenti, trattandosi di impianti realizzati su misura a seconda delle specifiche necessità: ciò nonostante, le informazioni ricavate hanno un'importanza evidente in quanto sono le stesse che vengono adoperate in fase di progettazione e dimensionamento dai costruttori.

Si può quindi dire in sintesi che questa tesi fornisce le informazioni necessarie per la scelta e l'ottimizzazione del sistema di filtraggio lato DC per un impianto HVDC a tiristori.

---

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] ABB Group R&D and Technology, ABB Review, 2/14, 2014.
- [2] D.M. Larruskain, I. Zamora, O. Abarrategui, A. Iraolagoitia, M. D. Gutiérrez, E. Loroño and F. de la Bodega: Power transmission capacity upgrade of overhead lines, su <http://www.icrepq.com/>
- [3] Rudervall R., Charpentier J.P., Sharma R., High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper, 2000
- [4] Siemens AG.: High Voltage Direct Power Transmission – Proven Technology for Power Exchange.
- [5] D.J.Melvold, W.F.Long: Back-to-back HVDC system performance with different smoothing reactors.
- [6] IEEE Standard 1124: IEEE Guide for Analysis and Definition of DC Side Harmonic Performance of HVDC Transmission Systems, 2003, Rev.2010
- [7] Graham J.F. et al, The Rio Madeira HVDC System – Design aspects of Bipole 1 and the connector to Acre-Rondônia, Cigrè 2012
- [8] Zhang X., Li N., Wu X: Equivalent Disturbing Current Limit for HVDC Project in New Period, 2010.
- [9] ITU-T Recommendation O.41: Psophometer for use on telephone-type circuits.
- [10] Wen J., Han M., Pan Y., Sun Z: Study on DC-Side Harmonics Interference Criteria for UHVDC Transmission Lines, IEEE, 2009.
- [11] Norma EN 50121-3-1: Railway applications – Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock – Train and complete vehicle.
- [12] Molyneux J., EMC for European Railways, Lloyd’s Register, 2010.
- [13] N.L.Shore, G.Anderson, A.P.Canelhas, G.Aspelund,: A three-pulse model of D.C. side harmonic flow in HVDC systems, 1989.
- [14] T.F.Garrity et.al, “Measurements of Harmonic Currents and Evaluation of the New England – Hydro-Quebec Phase I HVDC project” IEEE 1988.

- 
- [15] E.V.Larsen et al. "Impact of stray capacitance on HVDC Harmonics", IEEE/PES winter meeting, 1988.
- [16] AA.VV, Design Features of the Three Gorges – Changzhou  $\pm 500$  kV HVDC Project, presentato alla conferenza Cigrè tenutasi a Parigi, 2000.
- [17] Mohan N., Undeland T.M, Robbins W.P, Elettronica di potenza. Convertitori e applicazioni, Hoepli 2005.
- [18] AA.VV: Benefits of similar HVDC bipoles from three Gorges power generation complex, Cigrè, 2004.
- [19] Baoshu P. et al: Basic Design Aspects of Gui-Guang HVDC Power Transmission System, 2002
- [20] Jun Y., Zehong L., Yen S., Studies on Design of DC Filters of Three Gorges to Changzhou  $\pm 500$  kV HVDC Link, IEEE, 1998
- [21] Arillaga J., Watson N., Power system harmonics, John Wiley & Sons Ltd., 2003
- [22] Puming L, Quanrui H., The Algorithm for the Parameters of AC Filters in HVDC Transmission System, IEEE, 2008.
- [23] Bergdal B., Dass R., AC-DC Harmonic Filters for Three Gorges – Changzhou  $\pm 500$  kV HVDC Project.
- [24] Kong F., Zhang B.H., Ma S.Y., Analysis on High Frequency Attenuation Characteristic of HVDC Line Boundary, IEEE 2013
- [25] Li Z., REN Z., CHEN Y., Loss study of HVDC system, Electric Power Automation Equipment, Vol.27 No.1, Gennaio 2007.



## 8 APPENDICE

### 8.1 Dimostrazione dell'equivalenza tra due filtri ad accordo singolo in parallelo ed un filtro ad accordo doppio

Nel paragrafo 2.3.2.3 si è introdotta l'equivalenza fra due filtri singoli ideali<sup>63</sup> in parallelo ed un filtro ad accordo doppio, anch'esso ideale. La dimostrazione delle formule (2.8) introdotte a pagina 31 è la seguente.

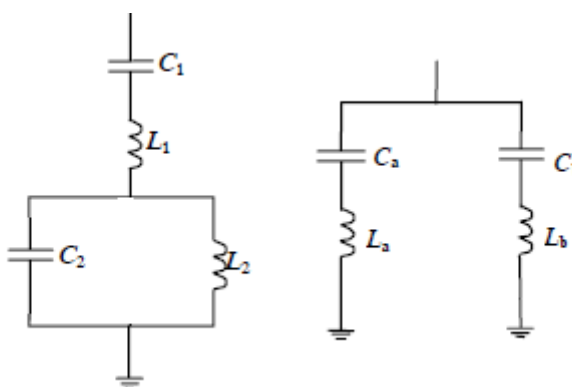


Figura 26 - Schema circuitale dei filtri oggetto di studio

L'impedenza dei due filtri ad accordo singolo posti in parallelo (Figura 26, a destra) è la seguente:

$$Z_{due\ singoli}(j\omega) = \frac{\omega^4 C_a C_b L_a L_b - \omega^2 (C_a L_a + C_b L_b) + 1}{-j\omega^3 (C_a C_b L_b + C_a C_b L_a) + j\omega (C_a + C_b)} \quad (8.1)$$

mentre l'impedenza del filtro ad accordo doppio (Figura 26, a sinistra) risulta

<sup>63</sup> Con il termine "ideale" si intende che non vi sono elementi dissipativi.

$$Z_{doppio}(j\omega) = \frac{\omega^4 C_1 C_2 L_1 L_2 - \omega^2 (C_1 L_1 + C_2 L_2 + C_1 L_2) + 1}{-j\omega^3 (C_1 C_2 L_2) + j\omega C_1} \quad (8.2)$$

L'equivalenza fra le due configurazioni si ottiene uguagliando le due impedenze  $Z_{due\_singoli}(j\omega)$  e  $Z_{doppio}(j\omega)$  per ogni valore di pulsazione, cioè imponendo che siano uguali i coefficienti corrispondenti dei termini  $\omega^4$  e  $\omega^2$  al numeratore e  $\omega^3$  e  $\omega$  al denominatore. Si perviene dunque ad un sistema di quattro equazioni in quattro incognite, che risolto permette di valutare i valori dei parametri del filtro ad accordo doppio che abbia comportamento identico a quello di due filtri ad accordo singolo dati.

$$\begin{cases} C_a C_b L_a L_b = C_1 C_2 L_1 L_2 \\ C_a L_a + C_b L_b = C_1 L_1 + C_2 L_2 + C_1 L_2 \\ C_a C_b L_b + C_a C_b L_a = C_1 C_2 L_2 \\ C_a + C_b = C_1 \end{cases} \quad (8.3)$$

Da cui, come già detto,

$$\begin{aligned} C_1 &= C_a + C_b & L_1 &= \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \\ C_2 &= \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(C_a L_a - C_b L_b)^2} & L_2 &= \frac{(C_a L_a - C_b L_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \end{aligned} \quad (8.4)$$

Come già indicato, non si possono trovare formule univoche che permettano di valutare i parametri di un filtro ad accordo doppio equivalente a due filtri ad accordo singolo una volta che si considerino anche i termini resistivi: imporre l'uguaglianza delle impedenze porta ad avere un sistema con più equazioni rispetto alle incognite che si hanno a disposizione. Una strategia può essere quella (seguita in questo lavoro) di ricavare il valore degli elementi capacitivi e induttivi dalle formule (8.4), ed assegnare successivamente al parametro resistivo del filtro ad accordo doppio quel valori che minimizza la differenza fra l'impedenza del filtro doppio e quella del parallelo dei due filtri singoli.