

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea triennale in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale

«Simulazione di raddrizzatori multimpulso per applicazione HVDC»

« Multipulse rectifiers' simulation for HVDC application »

Tutor universitario:

Prof. Andrea Tortella

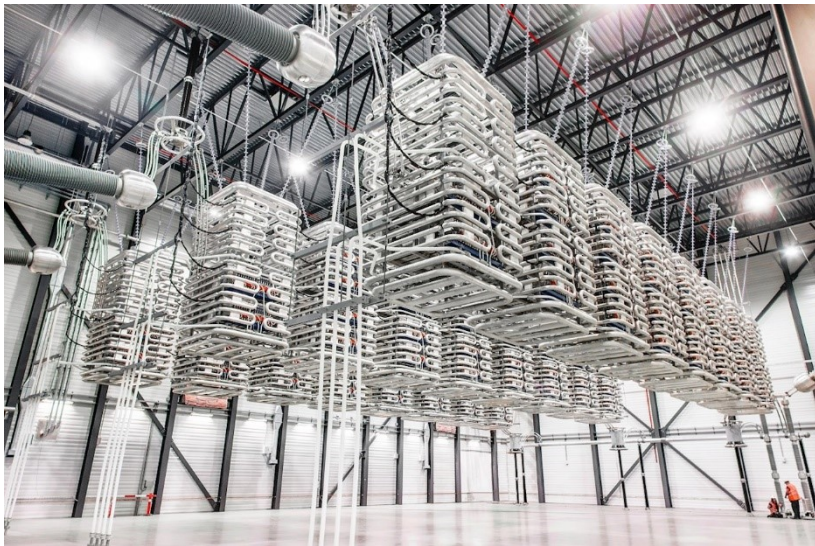
Laureando:

Federico Beraldin(n. matr. 1223414)

Padova, 13.07.2022

HVDC (“High Voltage Direct Current”):

- Trasmissione di elevate potenze su lunghe distanze
- Interconnessioni tra reti *AC* a diversa frequenza di alimentazione
- Riduzione delle perdite di potenza

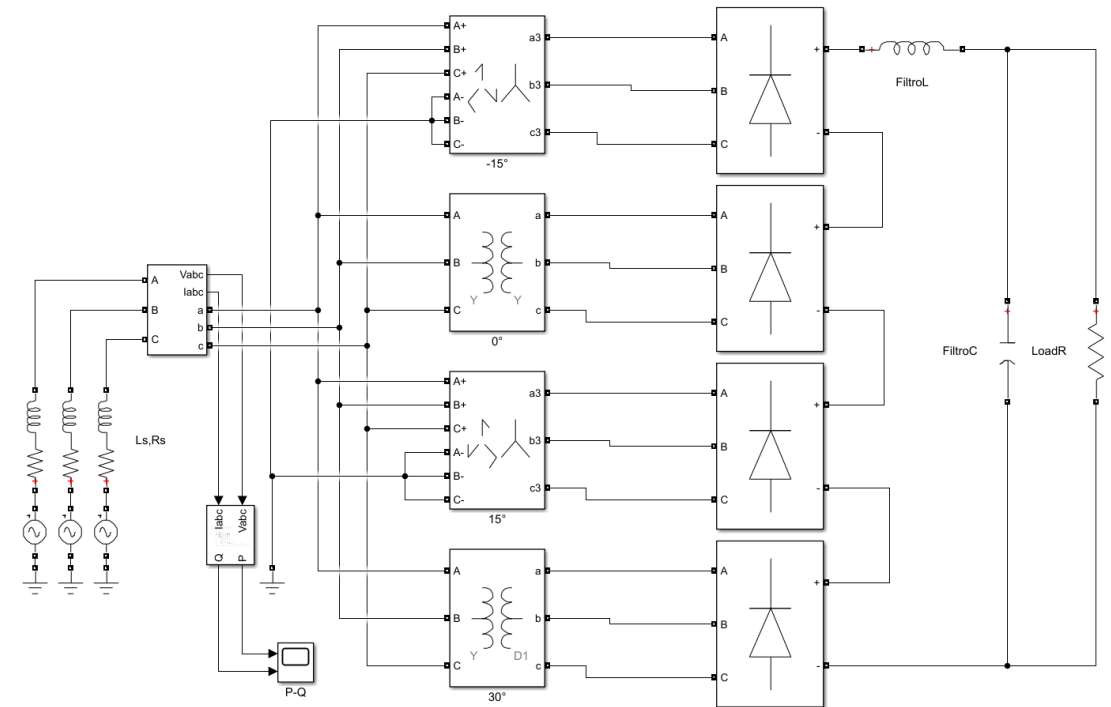
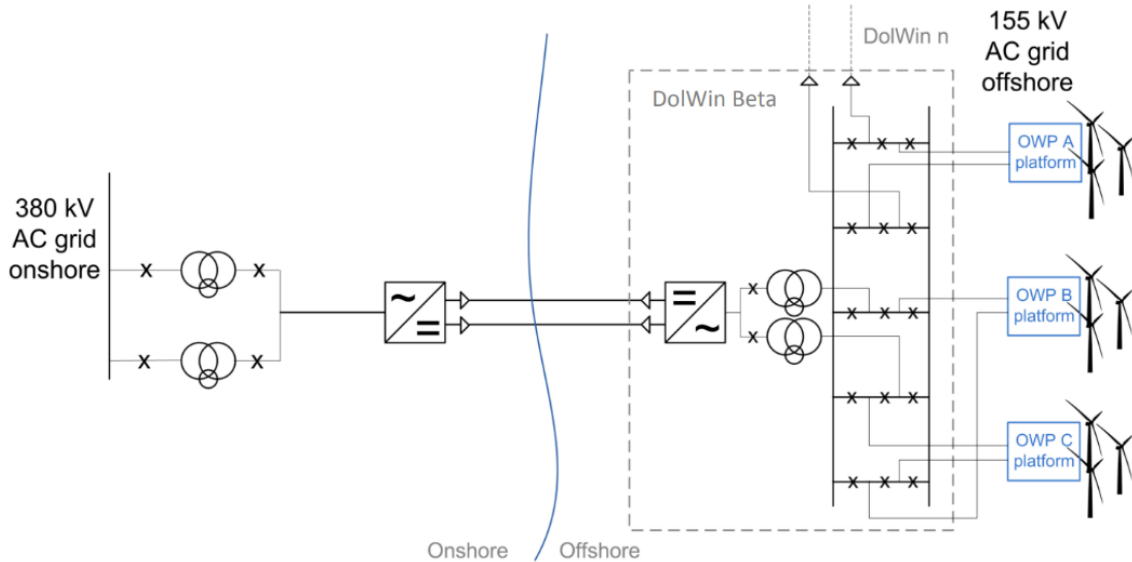


PRIMO OBIETTIVO

Studio e analisi della letteratura sulle applicazioni dei raddrizzatori multimpulso nelle applicazioni *HVDC*.

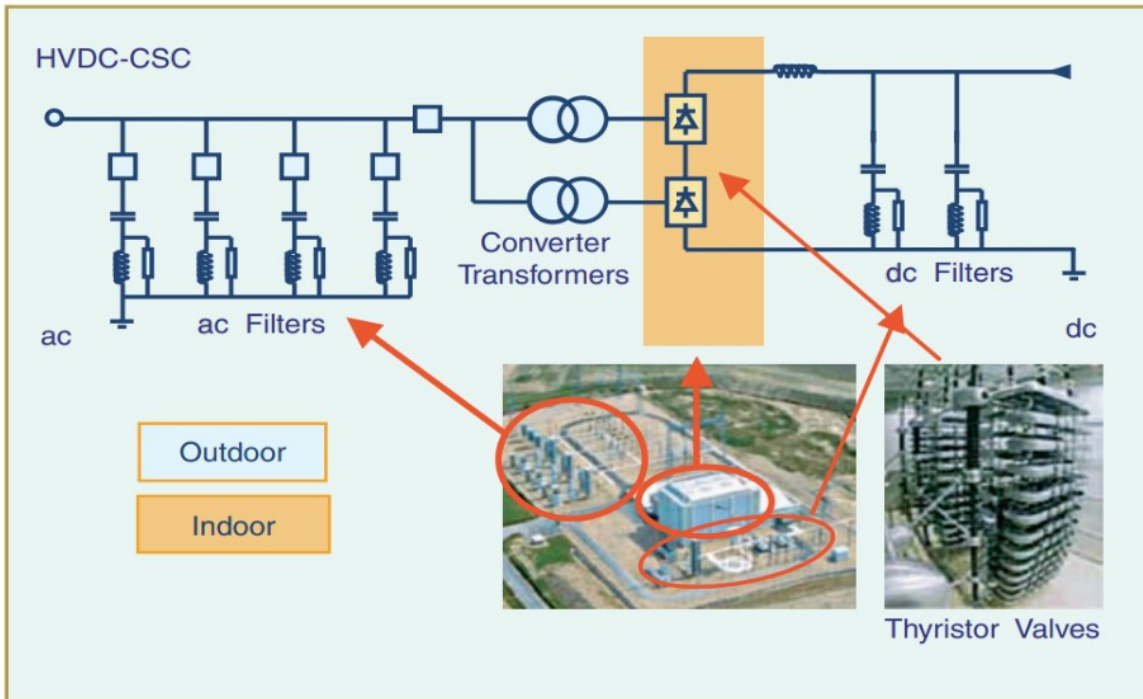
SECONDO OBIETTIVO

Confronto tra lo stato dell'arte e la simulazione attraverso il software *Simulink* di un raddrizzatore a 12 e 24 impulsi.



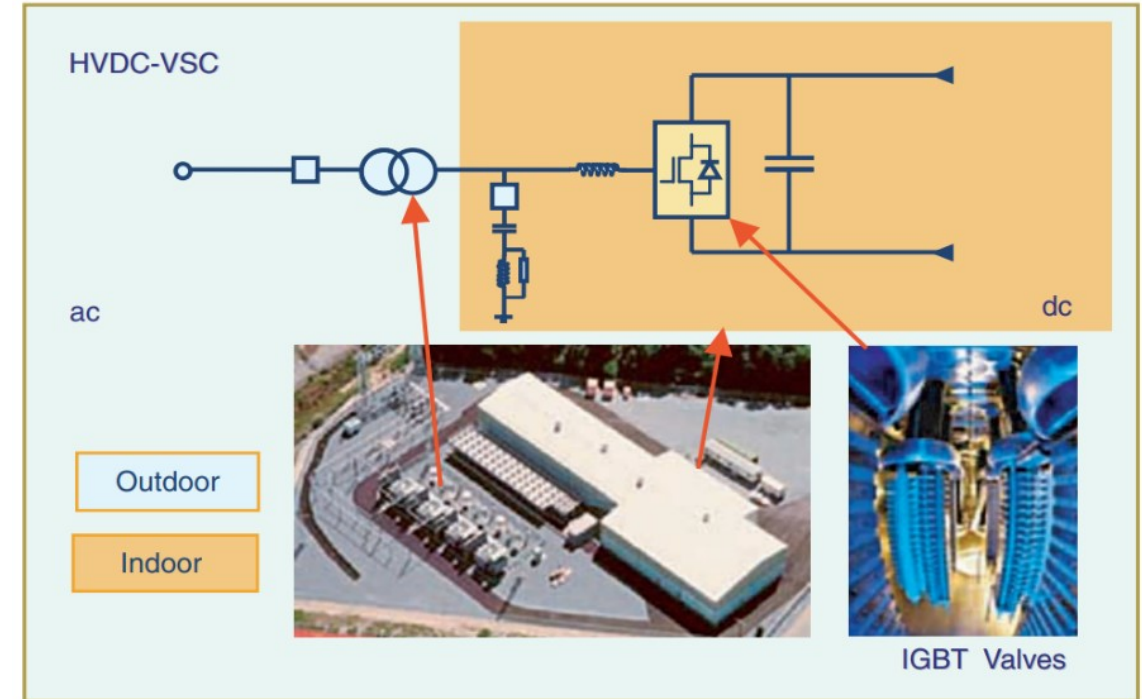
CSC (“Line-Commutated Current Source Converter”)

- Impiega valvole a tiristori come dispositivi di commutazione
- Necessitano di grandi induttori di spianamento lato DC
- Inversione del flusso di potenza attraverso l’inversione di polarità
- Assorbimento di potenza reattiva da parte dei convertitori
- Stazioni di conversione di grandi dimensioni



VSC (“Self-Commutated Voltage Source Converter”)

- Impiega valvole ad IGBT come dispositivi di commutazione
- Inversione del flusso di potenza attraverso l’inversione di corrente
- Controllo indipendente di potenza attiva e reattiva
- Funzionamento con reti deboli ed in isola
- Stazioni di conversione di dimensioni più contenute



I trasformatori di sfasamento sono delle macchine statiche indispensabili nei circuiti a 12 e più impulsi:

- Garantiscono uno sfasamento $\delta=60/n$ tra i secondari, dove n è il numero di unità elementari di raddrizzatori a 6 impulsi
- Consentono l'eliminazione di determinate armoniche

Vengono impiegati tre tipi di trasformatori:

- Y/Z-1
- Y/Z-2
- Δ/Z



I due raddrizzatori a ponte trifase sono alimentati da un trasformatore con due secondari rispettivamente a stella e a triangolo creando uno sfasamento δ pari a 30° .

La frequenza al carico è pari a $12f$.

Il segnale di impulso al gate viene fornito da un *Pulse Generator* che invia due sequenze di impulsi, *PY* e *PD*, ai raddrizzatori.

L'angolo di innesco α dei tiristori è comandabile attraverso un blocco costante connesso al generatore di impulsi.

Il filtro *LC* in uscita garantisce un'ondulazione minore della corrente e della tensione sul carico.

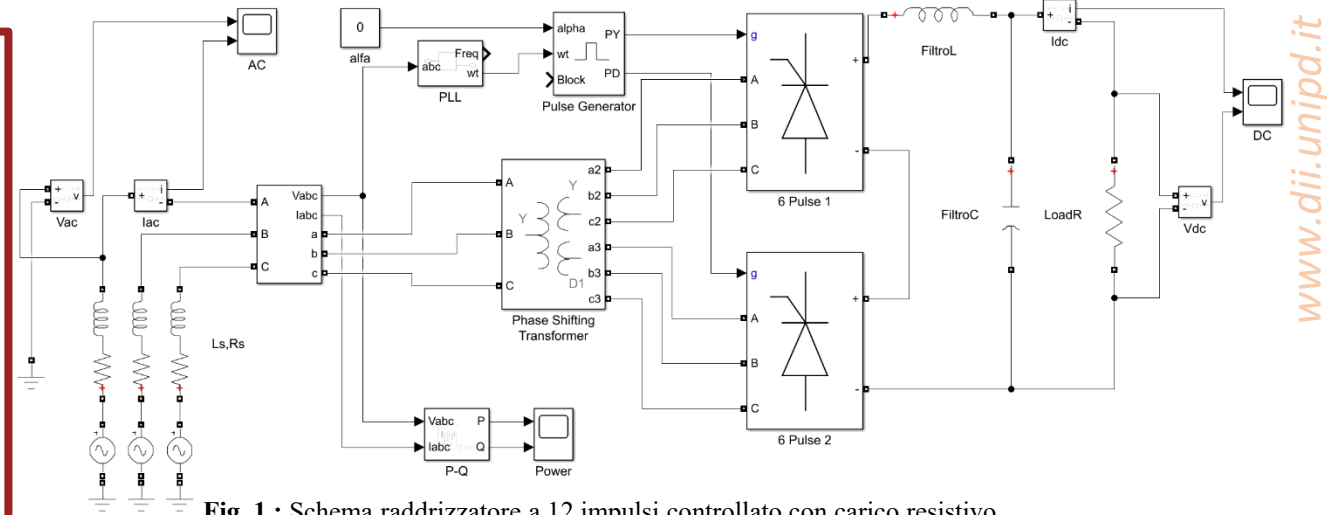


Fig. 1 : Schema raddrizzatore a 12 impulsi controllato con carico resistivo.

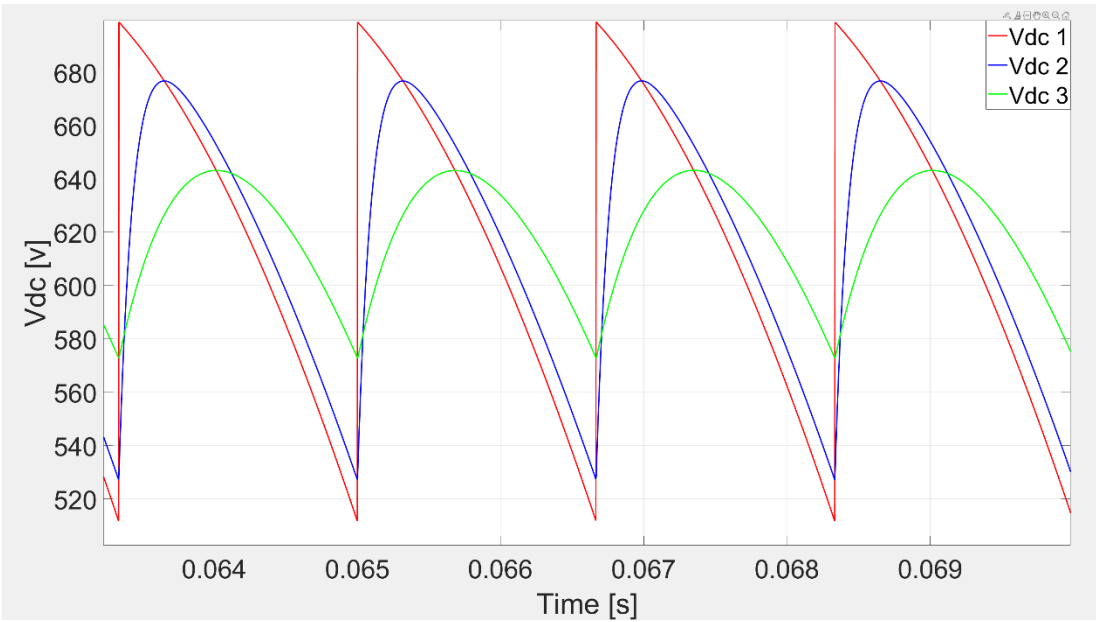


Fig. 2 : Tensione V_{dc} con angolo $\alpha=30^\circ$.

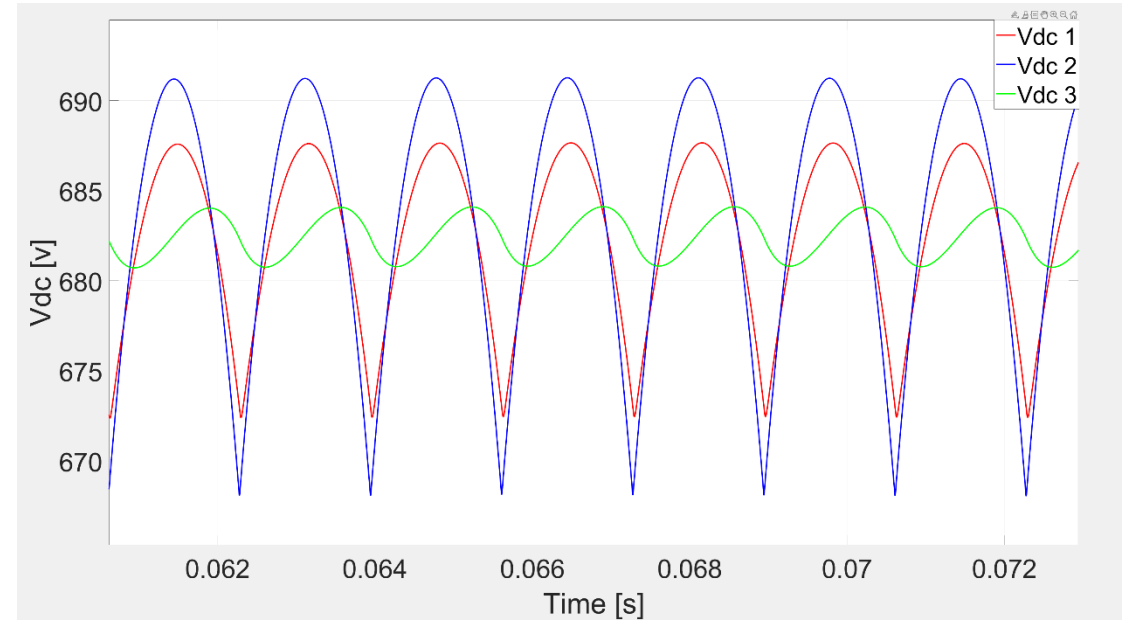


Fig. 3 : Tensione V_{dc} con angolo $\alpha=0^\circ$.

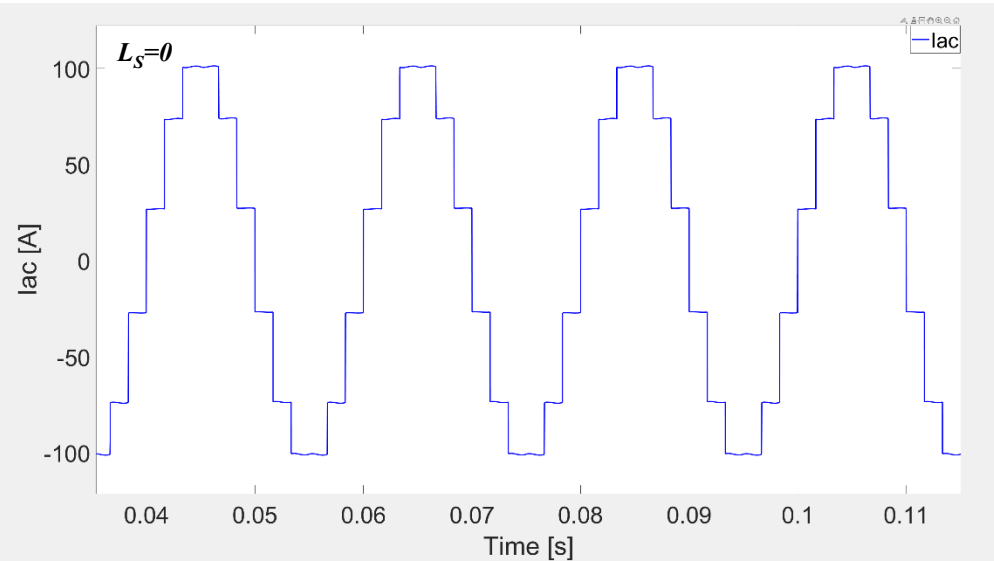


Fig. 4 : Corrente I_{ac} con $THD=15.18\%$.

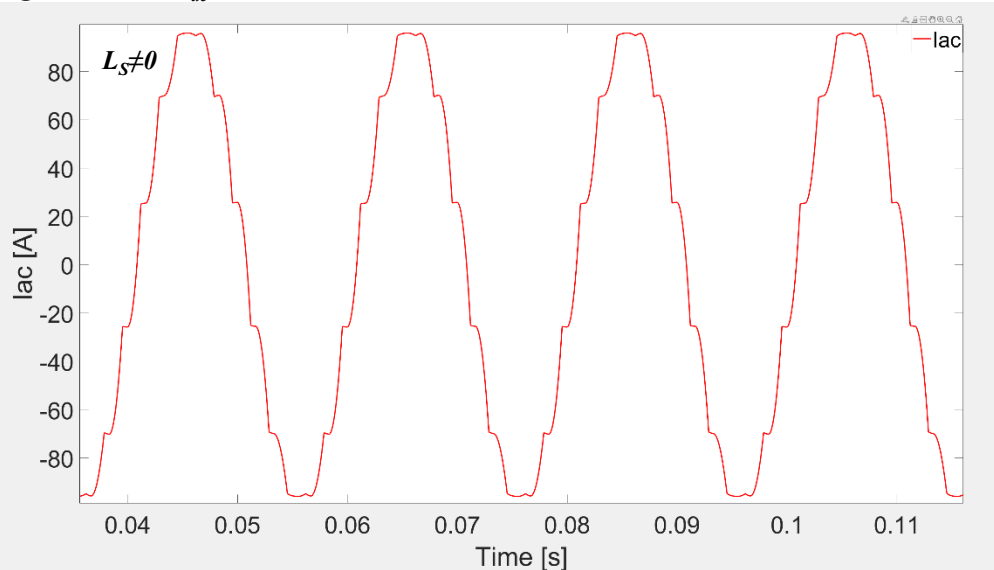


Fig. 5 : Corrente I_{ac} con $THD=6.71\%$.

Dall'analisi armonica si evince che il raddrizzatore a 12 impulsi consente l'eliminazione delle armoniche di ordine 5 e 7 della corrente di alimentazione I_{ac} , riducendone il livello di distorsione armonica THD .
Abbassando ulteriormente il THD la forma d'onda della corrente tende ad un andamento sempre più sinusoidale.

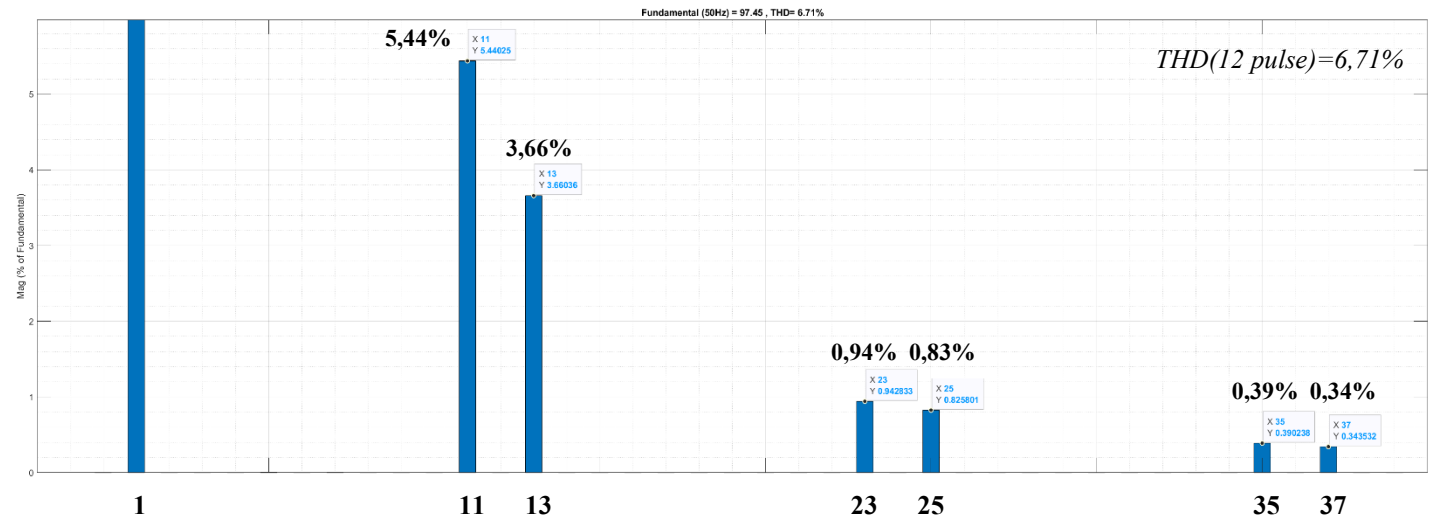
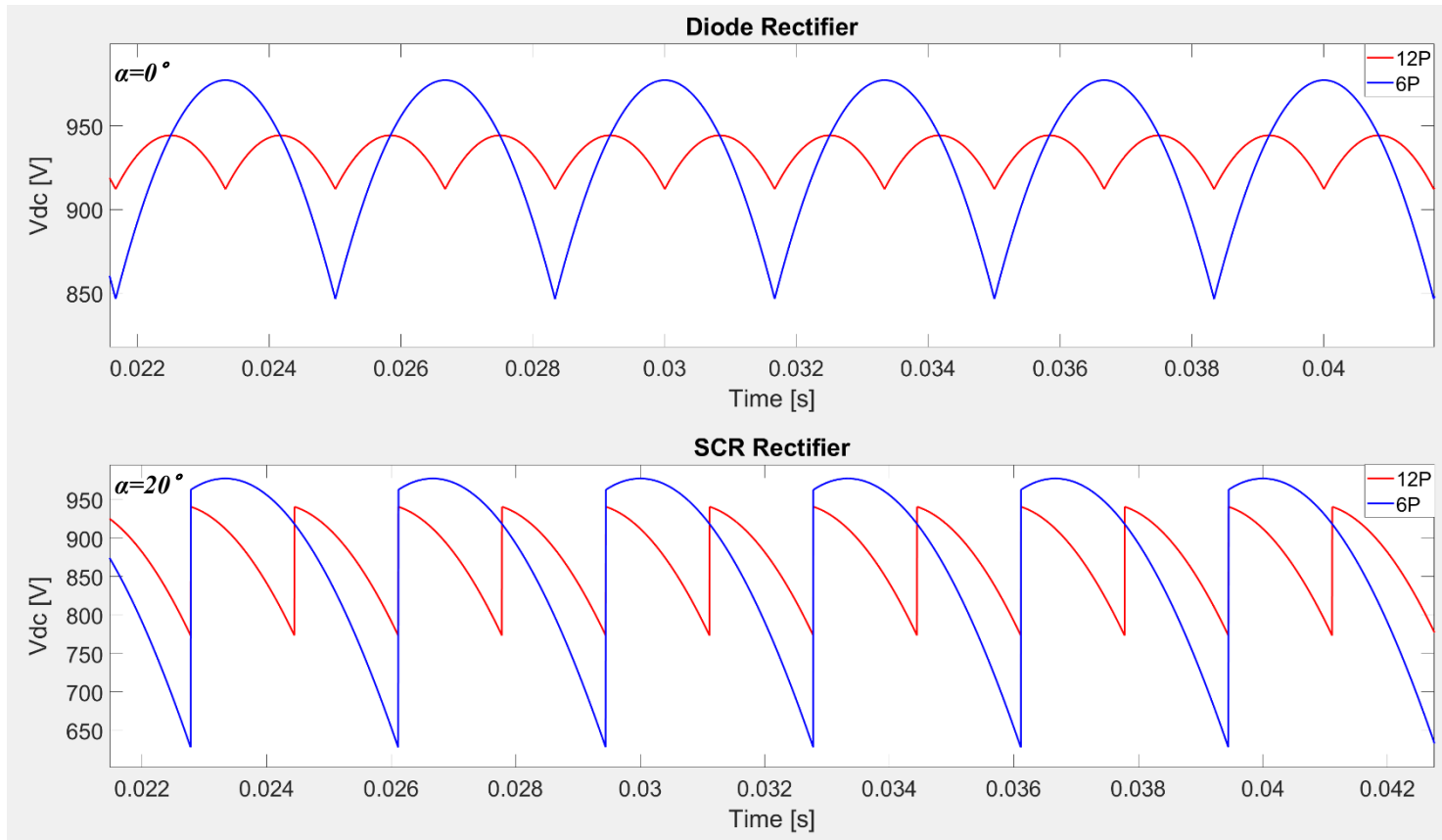


Fig. 6 : Analisi armonica percentuale rispetto all'armonica fondamentale di corrente I_{ac} .

A parità di parametri degli elementi costitutivi del circuito si notano tali differenze (con $L_S=0$):

- *Ripple* di tensione della V_{DC}
- Frequenza della tensione V_{DC}
- Assorbimento di potenza P - Q lato AC



	$P_{AC,max}$	$Q_{AC,max}$
$\alpha=0^\circ$	[kW]	[var]
6P	87,63	152,95
12P	87,46	152,7

	$P_{AC,max}$	$Q_{AC,max}$
$\alpha=20^\circ$	[kW]	[kvar]
6P	78,25	25,58
12P	77,46	27,58

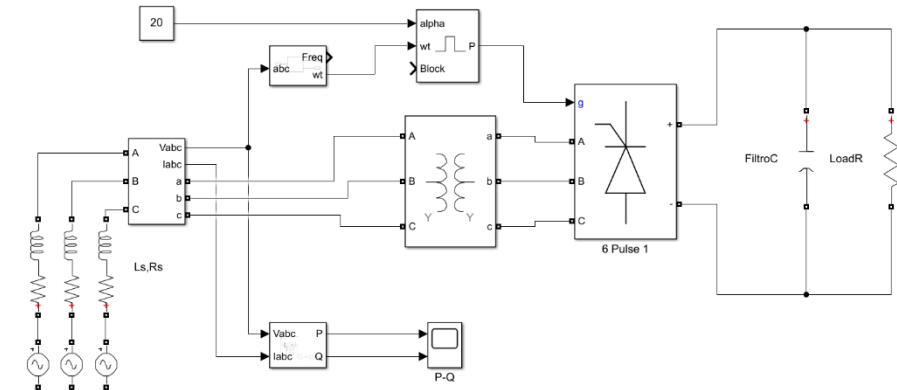


Fig. 7 : Raddrizzatore a 6 impulsi controllato.

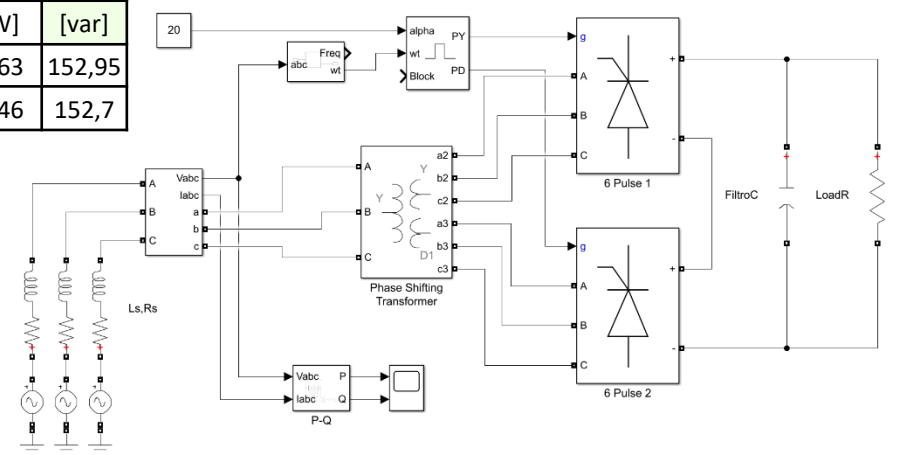


Fig. 8 : Raddrizzatore a 12 impulsi controllato.

Fig. 9 : Forme d'onda della tensione raddrizzata V_{DC} ai capi del carico resistivo con 6 e 12 impulsi.

Nel confronto tra il raddrizzatore a 6 e 12 impulsi si evince facilmente che il *THD* della corrente assorbita lato *AC*, in percentuale rispetto alla fondamentale, è circa il doppio nel caso del raddrizzatore a 6 impulsi.

Aumentando l'induttanza di linea L_S la forma d'onda inizia ad assumere una forma più "sinusoidale".

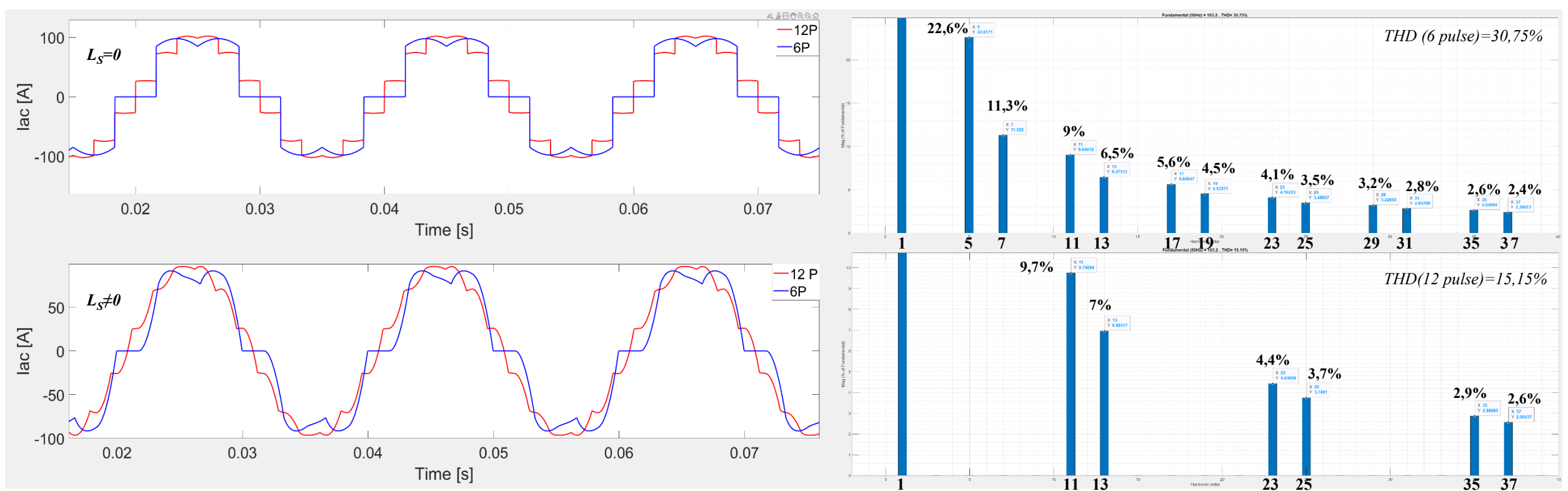


Fig. 10 : Forme d'onda della corrente assorbita lato *AC* e rispettivo spettro armonico.

	Generatore Sincrono
S_n	1 [MVA]
U_{In}	3.3 [kV]
f_n	50 [Hz]
p	2

	Trasformatore
S_n	1 [MVA]
U_{In}	3.3 [kV]
U_{2n}	10 [kV]
f_n	50 [Hz]

	Linea
<i>Tipo</i>	RG7H1R
S	95 [mm ²]
$r_{90^\circ C}$	0,248 [Ω /km]
x	0,12 [Ω /km]

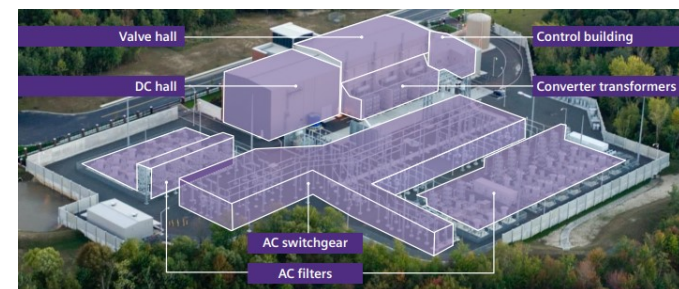
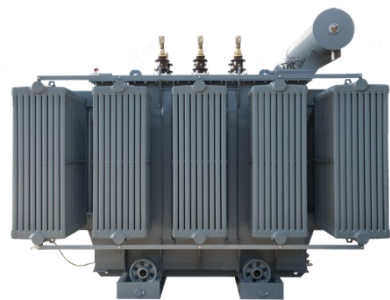
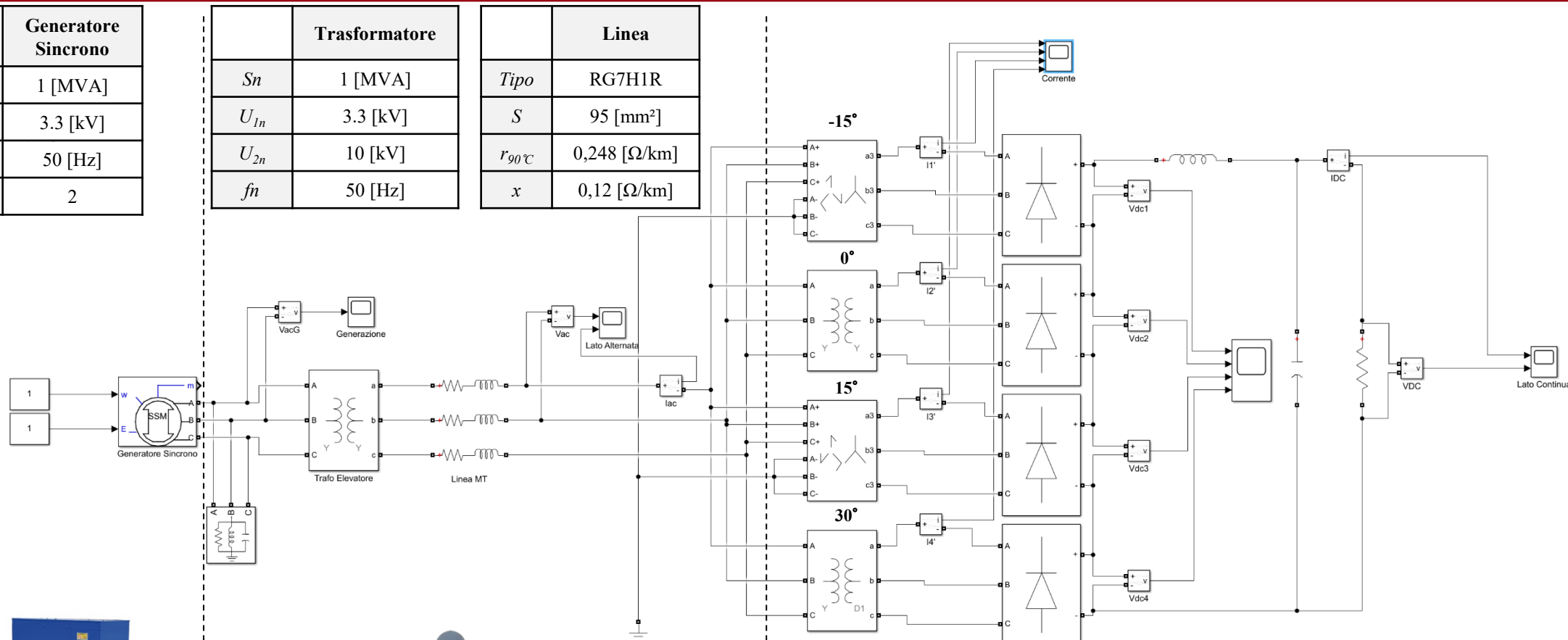


Fig. 11 :Generazione, trasmissione e conversione HVDC.

Nel raddrizzatore a 24 impulsi vengono utilizzati 4 trasformatori: zig-zag/stella (-15°), stella/stella (0°), zig-zag/stella (15°), stella/triangolo (30°).

Grazie a questo sfasamento $\delta=15^\circ$ si ottiene una forma d'onda della corrente I_A con un *THD* molto basso dovuto all'eliminazione delle armoniche di ordine 11 e 13.

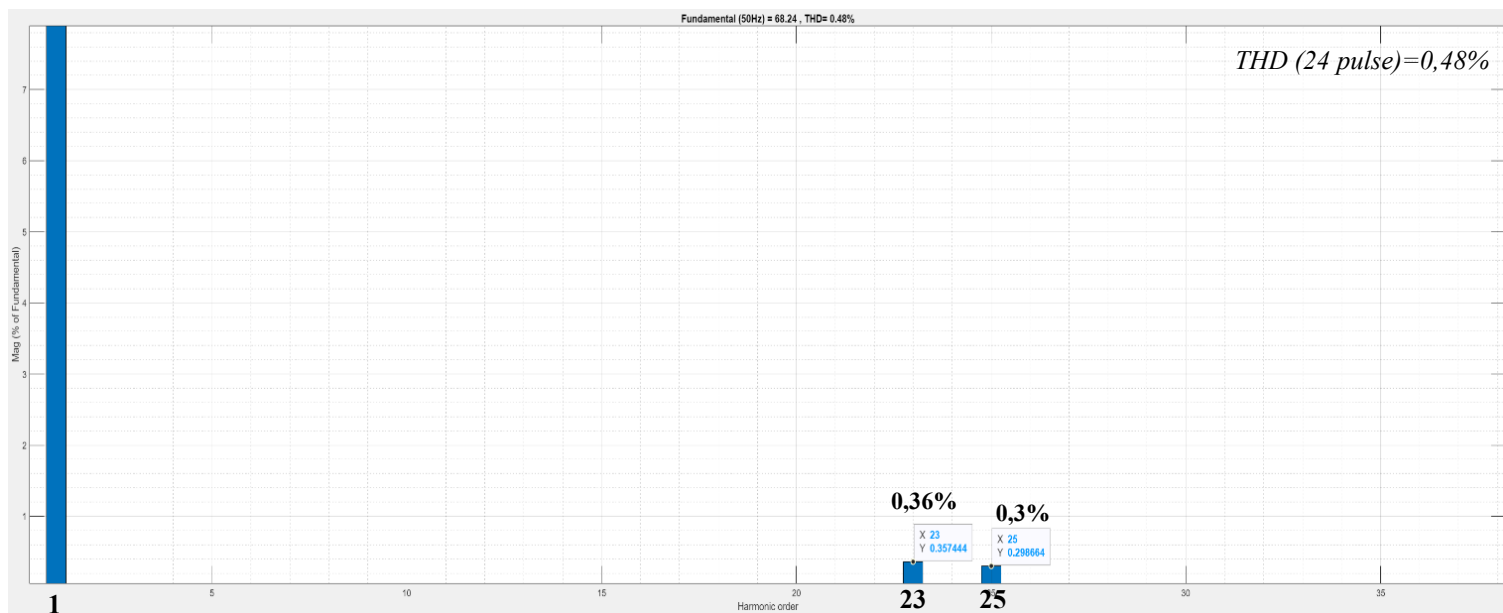


Fig. 14: Analisi armonica percentuale rispetto all'armonica fondamentale di corrente I_A .

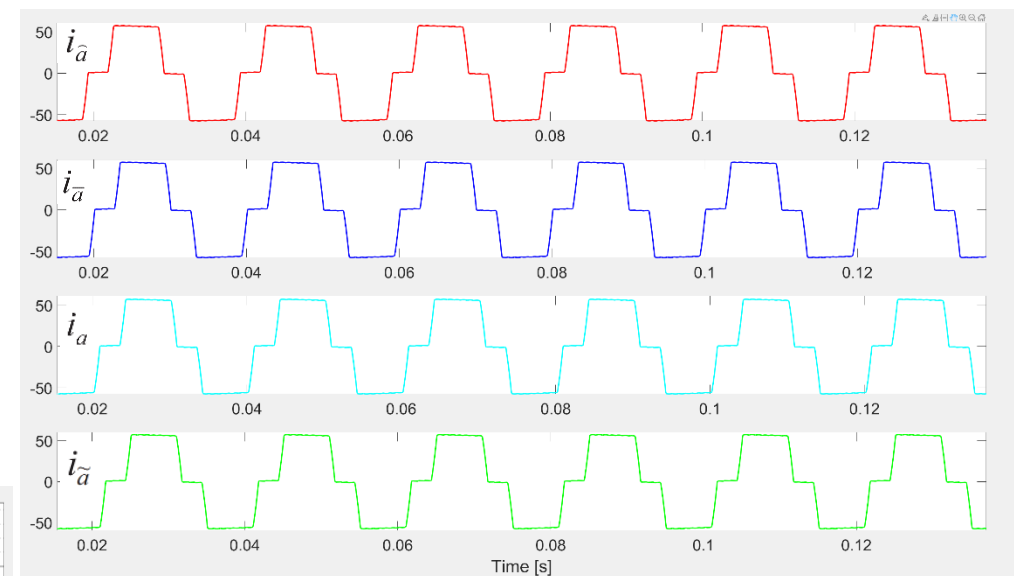


Fig. 12 : Correnti i_a relative al secondario dei trasformatori.

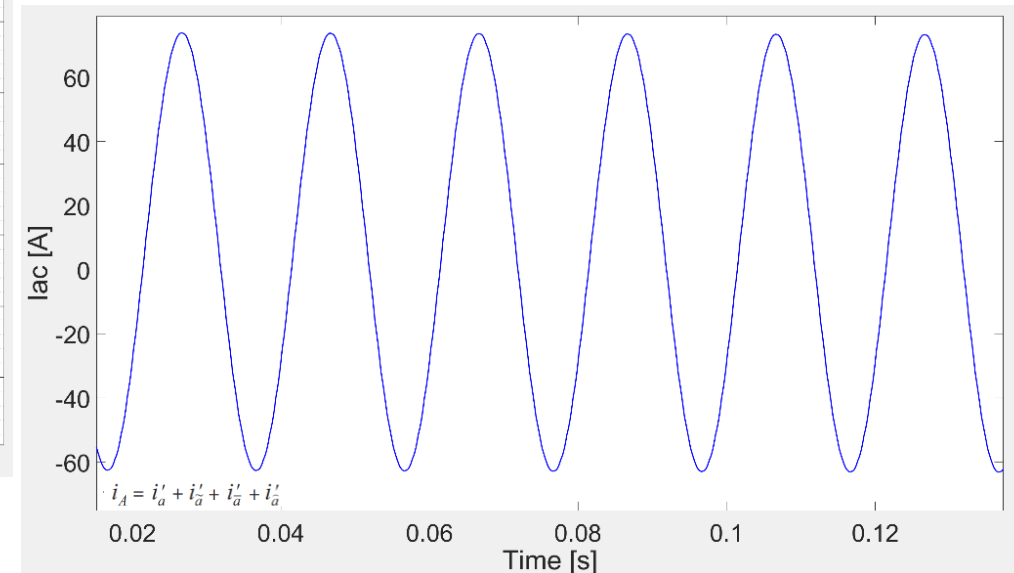


Fig. 13 : Corrente I_A al primario.

Analizzando le forme d'onda sul carico, caratterizzate da una frequenza pari a $24f$, si nota che la variazione tra il valore massimo e minimo assunte dall'ondulazione, sono tanto minori quanto maggiore è l'effetto filtrante del filtro LC .

Passando dalla curva blu senza filtro LC , all'aumentare della capacità di filtraggio, il *ripple* di tensione a 1200 Hz si attenua.

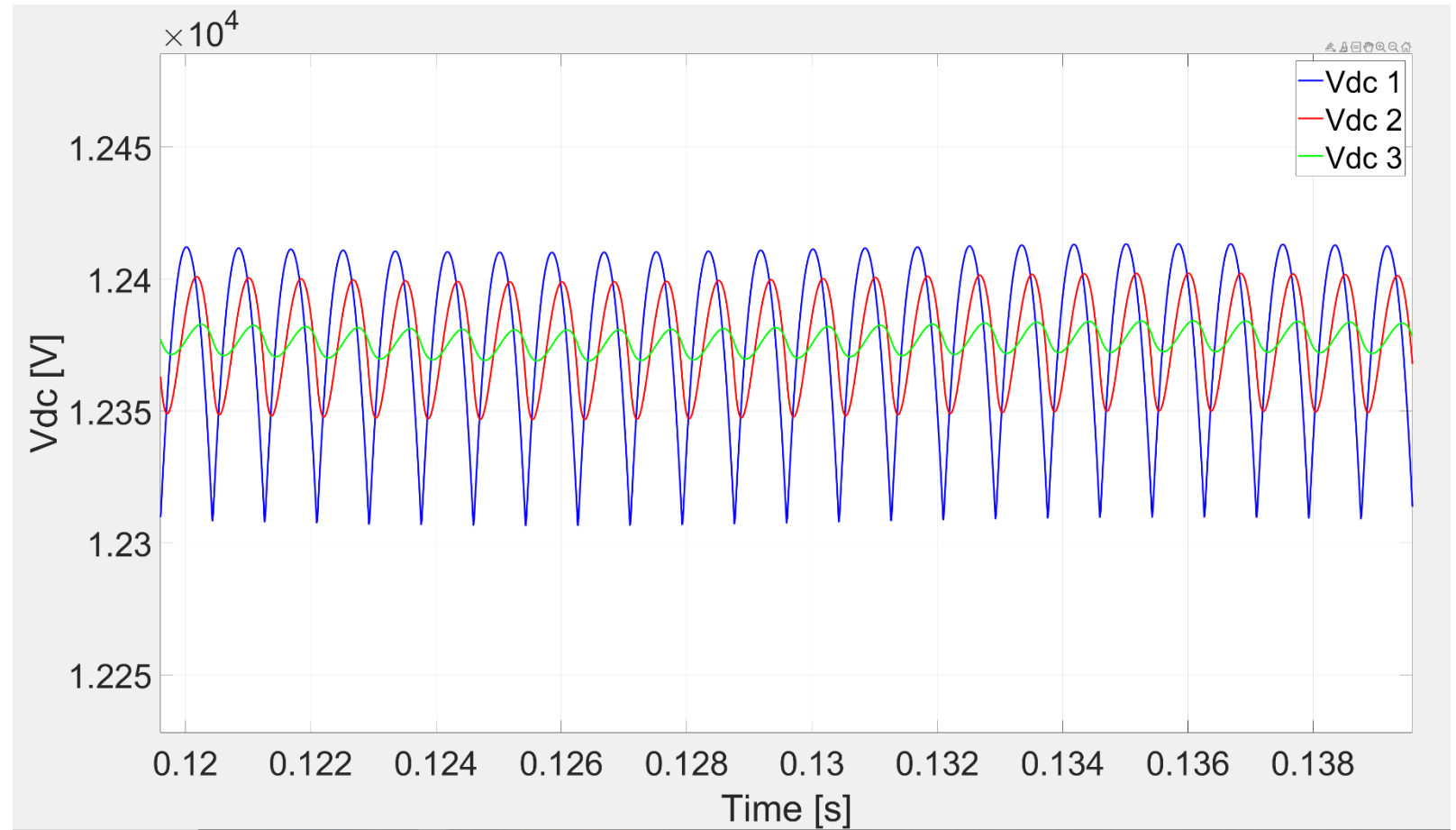


Fig. 15 : Forma d'onda della tensione raddrizzata V_{DC} ai capi del carico.

Sebbene la tecnologia a tiristori *LCC* si possa considerare superata in termini di *power quality* rispetto alle soluzioni *VSC* ad *IGBT* può garantire affidabilità e costi ancora competitivi, soprattutto nelle applicazioni di grossa potenza ed altissima tensione.

Dall'analisi dei dati delle simulazioni ottenuti mediante un codice *Simulink* che permette di svolgere svariate analisi di potenza attiva e reattiva, contenuto armonico, influenza dei parametri, si confermano i risultati teorici soprattutto in termini di distorsione armonica e forme d'onde caratteristiche, con la possibilità di estendere al caso di doppia stazione di conversione.

UNIPD CLASSIC / Brochure

www.dii.unipd.it



Grazie