

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica
Dipartimento di Elettrotecnica



**LA CONTINUA E I SISTEMI DI ACCUMULO NELLE
RETI DI DISTRIBUZIONE**

Relatore: Prof. Enrico Tironi

Correlatore: Ing. Luigi Piegari

Tesi di Laurea Specialistica di:
Flavio Pasquale
Matr. 735517

Anno Accademico 2009-2010

INDICE

Introduzione: La continua nelle reti di distribuzione - Pag. 3

Capitolo 1: Le reti in continua e l'accumulo ----- Pag. 6

Capitolo 2: Il caso di studio e la logica di controllo
adottata----- Pag. 21

Capitolo 3: La sincronizzazione----- Pag. 35

Capitolo 4: Simulazione 1: carico con elevata corrente
iniziale ----- Pag. 40

Capitolo 5: Simulazione 2: carico con frenatura a
recupero----- Pag. 60

Capitolo 6: Simulazione 3: carico disturbante ----- Pag. 84

Capitolo 7: Simulazione 4: buco di tensione ----- Pag. 97

Conclusioni: I risultati ottenuti dalle simulazioni ----- Pag. 111

Appendice: Lo schema in Simulink ----- Pag. 113

Fonti ----- Pag. 144

Ringraziamenti ----- Pag. 146

INTRODUZIONE:

La continua nelle reti di distribuzione

Con lo svilupparsi di nuove tecnologie nel campo dell'elettrotecnica sta ultimamente assumendo grande interesse l'ipotesi di reti di distribuzione realizzate in corrente continua.

I motivi di ciò sono strettamente legati ai costi di impianto e di esercizio, all'efficienza e alla qualità delle reti di distribuzione.

Per quanto riguarda i costi infatti, la possibilità di distribuire energia in continua utilizzando due soli conduttori, risulta sicuramente più economica rispetto ad una soluzione in alternata.

Inoltre, il costo dei convertitori elettronici di potenza che in continua sono indispensabili, si riduce sempre di più e sempre più carichi richiedono tali convertitori.

Anche le perdite su una linea in continua sono, a parità di sezione, inferiori e questo è significativo sia per quanto riguarda la riduzione dei costi di esercizio, sia per quanto riguarda l'efficienza.

Anche la generazione distribuita con fonti rinnovabili, che oggi è sempre più presente nelle reti di distribuzione, necessita di collegamenti in continua.

La continua migliora molto anche la qualità della distribuzione essendo essa meno soggetta a perturbazioni rispetto all'alternata.

Un altro vantaggio importantissimo della continua è la possibilità di impiegare sistemi di accumulo come batterie, condensatori elettrolitici e supercondensatori, tali sistemi di accumulo infatti per funzionare hanno bisogno di una tensione costante.

I vantaggi della presenza di questi sistemi di accumulo sono notevoli, sia dal punto di vista dell'efficienza sia dal punto di vista della qualità.

L'OBIETTIVO DELLA TESI

L'obiettivo di questa tesi è mostrare come una rete di distribuzione in continua, dotata di un sistema di accumulo in prossimità del carico, migliori significativamente la qualità, l'efficienza e l'economicità del sistema.

A tal fine è stato realizzato un modello in ambiente Matlab con Simulink che ne simula il comportamento.

Il modello realizzato consentirà la visualizzazione dell'andamento delle varie grandezze elettriche della rete in funzione del tipo di carico, della dimensione dell'accumulo e del tipo di regolazione utilizzato.

Questa tesi è divisa in 7 capitoli: il primo è un capitolo teorico che discuterà i principali vantaggi della continua e dei sistemi di accumulo, illustrandone brevemente i principali.

Nel secondo capitolo verrà invece presentato il caso di studio, verrà descritta la logica di controllo adottata nella realizzazione del modello in Simulink realizzato al fine di questa tesi e verranno stabiliti alcuni dei valori delle grandezze elettriche riguardanti il caso di studio.

Il terzo capitolo è dedicato alla sincronizzazione della rete rappresentata nel modello in Simulink.

I restanti capitoli dal 4 al 7 sono invece dedicati alle simulazioni:

La prima simulazione riguarda un carico caratterizzato da un'elevata corrente iniziale e vuole mostrare come essa si possa compensare, in modo da non sovraccaricare la rete.

La seconda simulazione tratta un carico con un ciclo di lavoro caratterizzato da un assorbimento seguito da una frenatura con recupero. In questo caso si vuole vedere come un sistema di accumulo può evitare lo spreco dell'energia di frenatura nel caso in cui la rete non sia in grado di assorbirla.

La terza simulazione impiega un carico disturbante che ha un assorbimento fortemente variabile nel tempo. Il sistema di accumulo è qui impiegato per impedire un'eccessiva riduzione della qualità della tensione con conseguente comparsa di flicker.

La quarta e ultima simulazione considera invece il caso di un buco di tensione dovuto a un guasto nell'alimentazione che alimenta un carico costante. Anche in

questo caso si vuole vedere come un sistema di accumulo può ridurre gli effetti negativi di questo malfunzionamento.

Dopo le conclusioni è riportata un'appendice che descrive dettagliatamente la struttura e i blocchetti del modello in Simulink realizzato.

CAPITOLO 1:

Le reti in continua e l'accumulo

In questo capitolo si esamineranno le principali caratteristiche delle reti in continua, l'impiego dei sistemi di accumulo collocati in parallelo ai carichi e le principali caratteristiche dei più utilizzati.

Si esamineranno in particolare i vantaggi dal punto di vista di qualità, efficienza ed economicità introdotti dall'impiego della continua e dell'accumulo.

Infine si vedranno brevemente il flicker e i buchi di tensione che saranno poi trattati rispettivamente nella terza e nella quarta simulazione di questa tesi.

LE RETI IN CONTINUA

Nonostante gran parte delle reti oggi siano in alternata la riduzione dei costi dei componenti di elettronica di potenza e i vantaggi tecnici che la continua comporta ne stanno aumentando la diffusione, in particolare molto spesso tra rete in alternata e carico in alternata c'è un breve collegamento in continua che permette una migliore regolazione della potenza.

In figura 1.1 si trova uno schema generico di una rete di distribuzione in continua che mostra le principali tipologie di componenti che lo costituiscono.

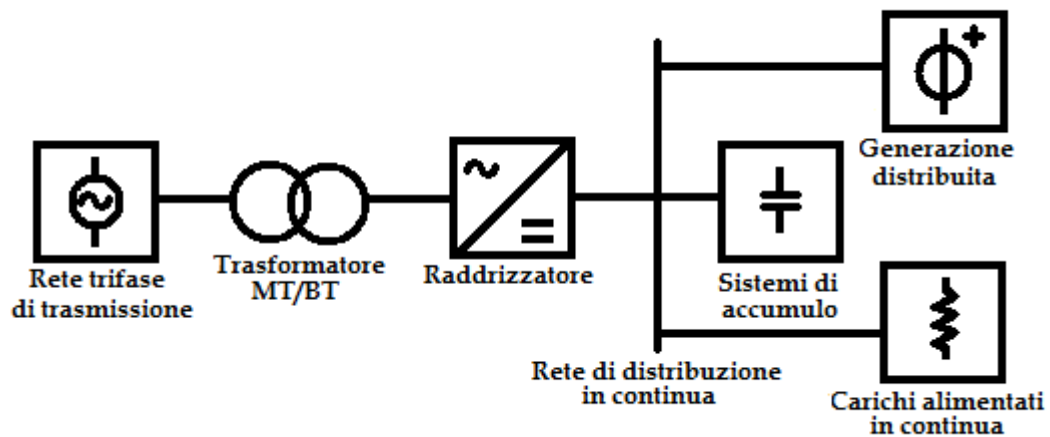


Figura 1.1: generica rete di distribuzione in continua

Le principali caratteristiche delle reti di distribuzione in continua sono:

- Migliore regolazione della potenza
- Miglior comportamento in caso di cortocircuiti
- Minor numero di conduttori e minori perdite
- Maggior sicurezza per le persone
- Possibilità di utilizzo di sistemi di accumulo

I maggiori limiti della continua sono due:

- Elevato costo dei convertitori
- Maggiori difficoltà di interruzione in caso di guasto

MIGLIORE REGOLAZIONE DELLA POTENZA

In una rete di distribuzione o in un collegamento in corrente continua i flussi di potenza sono regolati attraverso il comando dei convertitori.

Inoltre in continua non c'è potenza reattiva che provoca perdite, cadute di tensione più elevate e permette quindi il passaggio di una potenza attiva inferiore nei conduttori.

In una rete di distribuzione in continua inoltre, posso regolare il convertitore collegato alla rete a monte in alternata, in modo che faccia assorbire a tutta la rete in continua una potenza con $\cos(\varphi)=1$ o, se necessario, anche con un $\cos(\varphi)$ inferiore a 1 in anticipo in caso si voglia produrre potenza reattiva.

MIGLIOR COMPORTAMENTO IN CASO DI CORTOCIRCUITI

In una rete di distribuzione in alternata, in caso di cortocircuito, le correnti da esso generate si propagano per tutta la rete prima che il guasto sia estinto.

In caso di una rete in continua invece, i convertitori limitano le correnti di cortocircuito troppo elevate in tempi brevissimi a valori dell'ordine del doppio della loro corrente nominale.

MINOR NUMERO DI CONDUTTORI E MINORI PERDITE

Un altro importante vantaggio delle reti di distribuzione in continua è il minor numero di conduttori impiegati (2 invece che 3).

Questa riduzione del numero di conduttori avviene solo nei casi in cui la rete di distribuzione sia trifase.

A parità di sezione anche le perdite su una rete di distribuzione in continua sono inferiori.

Il tutto risulta in linee più economiche, sia per quanto riguarda i costi di impianto che di esercizio.

Bisogna anche sottolineare come inferiori perdite significano inferiori sprechi di energia e quindi migliore efficienza.

MAGGIOR SICUREZZA PER LE PERSONE

Considerando due reti di distribuzione a pari valore efficace di tensione e corrente una in continua e una in alternata, una persona sarebbe soggetta a maggior rischio per la propria salute in caso di contatto con la linea in alternata.

Una corrente alternata a 50Hz o 60Hz infatti arreca più danni alle persone, a pari valore efficace, di una corrente continua o ad alta frequenza in caso di attraversamento del corpo.

POSSIBILITA' DI UTILIZZO DEI SISTEMI DI ACCUMULO

Un ulteriore vantaggio della continua decisamente importante è la possibilità di impiego dei sistemi di accumulo in prossimità dei carichi, tali sistemi sono utilissimi per migliorare l'efficienza e la qualità della rete.

In alternata invece non è possibile collegare direttamente questi sistemi di accumulo che per il corretto funzionamento necessitano di tensioni costanti che variano in funzione del loro stato di carica.

In questa tesi è proprio l'accumulo il principale soggetto delle simulazioni, esso, come si vedrà, è in grado di effettuare il peak shaving, cioè di eliminare i picchi di potenza fastidiosi, è in grado di recuperare energia che verrebbe invece sprecata, ed è in grado di ridurre sia i disturbi generati dall'alimentazione sia quelli generati dal carico.

GLI SVANTAGGI DELLA CONTINUA

La continua ha però anche degli svantaggi che ne limitano l'utilizzo: il costo dei convertitori è elevato e incide molto sul costo totale, nonostante le reti siano più economiche e con perdite inferiori rispetto a quelle in alternata spesso non risulta quindi economicamente conveniente realizzarle.

Un ulteriore limite alla realizzazione di reti di distribuzione in continua è anche il fatto che quasi tutte le reti di distribuzione oggi sono in alternata e sostituirle implica costi notevoli.

Un altro difetto significativo della continua è la difficoltà di interruzione in caso di guasto, la corrente infatti, al contrario dell'alternata, non passa mai per lo zero e un'apertura del circuito provocherebbe un arco elettrico sull'apparecchio di interruzione.

L'apertura del circuito in seguito a guasto è quindi molto più complessa in continua e necessita di apparecchiature molto più costose.

L'ACCUMULO

I sistemi di accumulo di energia rivestono un ruolo fondamentale per il risparmio energetico, essi infatti svolgono l'importante ruolo del livellamento della potenza, utile sia a livello di generazione che di utilizzazione dell'energia elettrica.

A livello di generazione, soprattutto con la recente svolta verso l'aumento di produzione con fonti rinnovabili, che rispetto alle fonti non rinnovabili presentano una disponibilità di potenza molto più variabile e imprevedibile a seconda della stagione, dell'orario o del tempo atmosferico, i sistemi di accumulo consentono di immagazzinare energia durante i periodi di maggior produzione e di renderla disponibile nei periodi in cui la produzione è minore.

A livello di utilizzazione i sistemi di accumulo svolgono due importanti ruoli, il primo è di funzionare come fonte di alimentazione alternativa in caso l'alimentazione principale venga a mancare in seguito a un guasto, il secondo che verrà esaminato in modo più approfondito in seguito, è di livellare la potenza assorbita in quei carichi che hanno cicli di lavoro variabili nel tempo, facendo in modo che la potenza assorbita dalla rete risulti il più possibile costante. Altro importante ruolo di questi sistemi di accumulo è quello di poter recuperare l'energia che verrebbe altrimenti dissipata durante le frenature

Un tipico carico caratterizzato da continue frenature è il carroponte.

In questo caso il risparmio risulta evidente nel recupero di energia che altrimenti verrebbe sprecata mentre il livellamento della potenza assorbita oltre a ridurne il costo effettivo permette anche di avere l'impianto di alimentazione dimensionato su una potenza massima inferiore rendendolo così meno oneroso.

Il problema principale dell'accumulo risulta l'impossibilità di immagazzinare l'energia elettrica come tale, è quindi necessario trasformarla in altre forme di

energia come ad esempio energia cinetica, potenziale, magnetica, elettrostatica o elettrochimica.

I sistemi di accumulo presenti oggi sono svariati, in questa tesi verranno esaminati in particolare tutti quei sistemi di accumulo che agiscono in parallelo ai carichi per migliorare qualità ed efficienza della loro alimentazione.

I sistemi di accumulo che svolgono questo ruolo sono principalmente di due tipi: accumuli di tipo elettrostatico (condensatori elettrolitici e supercondensatori) e accumuli di tipo elettrochimico (batterie e celle a combustibile).

I SISTEMI DI ACCUMULO DI TIPO ELETTROCHIMICO: BATTERIE E CELLE A COMBUSTIBILE

Un tipo di accumulo molto diffuso in parallelo ai carichi è l'accumulo di tipo elettrochimico, esso si divide principalmente in due tipi di accumulatori, le batterie e le celle a combustibile.

L'accumulo elettrochimico si basa, come suggerisce il nome, su scambi di energia associati alle reazioni chimiche.

Esse possono essere spontanee o forzate a seconda che si voglia erogare o assorbire energia e un accumulatore chimico per dirsi tale deve essere in grado di fare entrambe le cose.

Il primo sistema di accumulo di tipo elettrochimico che esamineremo brevemente sono le batterie.

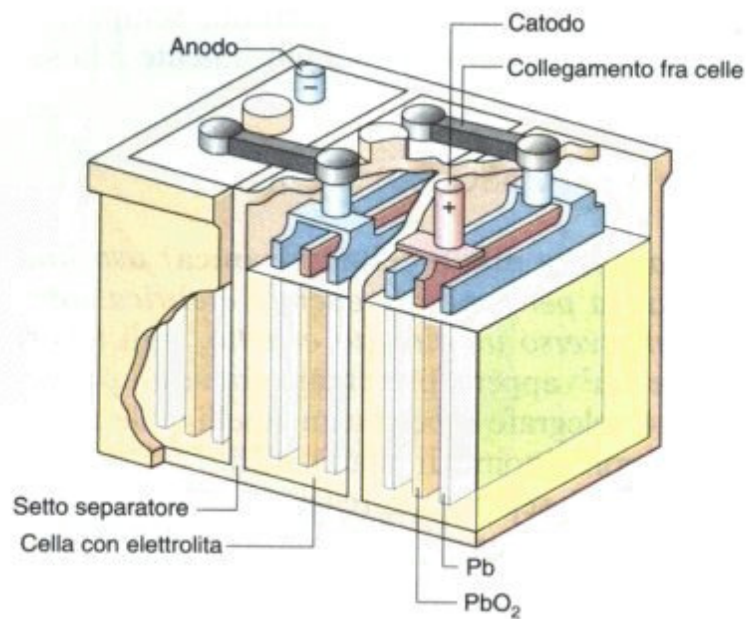


Figura 1.2: struttura di una batteria al piombo

L'elemento più piccolo di una batteria si chiama cella galvanica e solitamente una batteria è composta da più celle elettricamente interconnesse a formare un insieme unitario.

Ogni cella galvanica è costituita da due elettrodi e un materiale elettrolita.

I due elettrodi formano il polo positivo e il polo negativo della cella, sono fatti di materiale conduttore e sono divisi tra loro dall'elettrolita.

L'elettrolita deve essere un buon isolante elettrico per evitare la scarica della batteria ma allo stesso tempo deve essere un buon conduttore ionico per permettere agli ioni di passare da un elettrodo all'altro e permettere così le reazioni chimiche e la chiusura del circuito.

Prendendo ad esempio la batteria al piombo (figura 1.2) il polo positivo è costituito da ossido di piombo mentre quello negativo da piombo mentre l'elettrolita è acido solforico allo stato liquido.

Quando cedono energia le batterie sono in fase di scarica e avvengono le reazioni spontanee mentre quando l'energia viene assorbita c'è la fase di carica e avvengono le reazioni forzate.

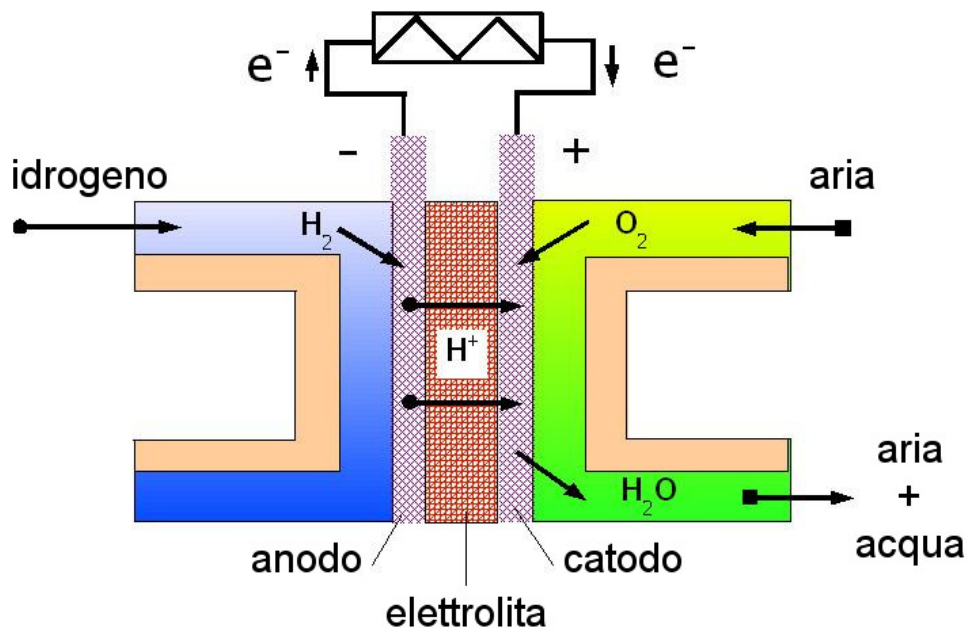


Figura 1.3: struttura di una cella a combustibile a idrogeno

L'altro sistema di accumulo di tipo elettrochimico che esamineremo brevemente sono le celle a combustibile.

Le celle a combustibile hanno un funzionamento abbastanza simile a quello delle batterie, infatti anche esse sono composte da due elettrodi, uno positivo e uno negativo, e un elettrolita per la conduzione ionica.

La differenza rispetto alle batterie sta nel fatto che nelle celle a combustibile c'è uno scambio di materia con l'esterno.

Nell'esempio in figura 1.3 è presentata una cella che utilizza idrogeno come combustibile, esso viene in contatto con l'elettrodo negativo, cede gli elettroni e passa come ioni attraverso l'elettrolita per poi combinarsi con l'ossigeno all'elettrodo positivo e dare acqua.

Bisogna sottolineare che gli elettrodi in questo caso non reagiscono ma fungono unicamente da catalizzatori.

Le celle a combustibile comunque, non sono degli accumuli in senso stretto perché l'energia non è immagazzinata al loro interno ma è di fatto costituita dal combustibile.

I SISTEMI DI ACCUMULO DI TIPO ELETTROSTATICO: CONDENSATORI ELETTROLITICI E SUPERCONDENSATORI

Un altro tipo di accumulo diffuso in parallelo ai carichi è l'accumulo di tipo elettrostatico, esso si divide principalmente in due tipi di accumulatori, i condensatori elettrolitici e i supercondensatori.

L'accumulo di tipo elettrostatico si basa sull'energia immagazzinata in un campo elettrico per la presenza di cariche, tale energia si può esprimere come:

$$W=q*V/2$$

dove q è la carica e V il potenziale.

Definita la capacità C come:

$$C=q/V [F]$$

L'energia è più semplicemente calcolata come:

$$W=C*V^2/2$$

L'energia immagazzinabile aumenta con il quadrato della tensione e linearmente con la capacità.

Compatibilmente con le esigenze tecniche e con i costi che questo comporta, un aumento della capacità comporta un miglioramento dal punto di vista della quantità di energia immagazzinabile.



Figura 1.4: condensatori elettrolitici

Costruttivamente la capacità aumenta all'aumentare della costante dielettrica ϵ dell'isolante che separa le cariche positive dalle negative e all'aumentare della superficie su cui le cariche possono distribuirsi mentre diminuisce all'aumentare della distanza tra le due distribuzioni di cariche.

Il primo sistema di accumulo elettrostatico che esamineremo sono i condensatori elettrolitici.

I condensatori elettrolitici sono composti da due elettrodi: un elettrodo (anodo), sul quale viene formato uno strato di ossido con elevata costante dielettrica che funge da isolante, l'altro il catodo è invece costituito da un elettrolita, un fluido elettricamente conduttore di solito formato da una soluzione salina od acida, e da un secondo elettrodo metallico che, nella maggior parte dei casi, coincide con il contenitore stesso.

In quest'ultimo caso, l'involucro metallico esterno stabilisce il collegamento tra l'elettrolita ed il terminale negativo del condensatore.

Lo spessore dello strato di ossido varia in funzione della tensione di lavoro, e normalmente assume valori dell'ordine degli $0,001\mu\text{m}$.

Il piccolo spessore dello strato, e la sua costante dielettrica relativamente elevata, permettono di ottenere valori capacitivi molto elevati, essi sono infatti i condensatori con capacità più elevata se paragonati con gli altri tipi.

I condensatori elettrolitici possono essere a base di alluminio o di tantalio.

Nei condensatori elettrolitici non è presente un materiale dielettrico, ma l'isolamento è dovuto alla formazione e mantenimento di un sottilissimo strato di ossido metallico sulla superficie di una armatura.

A differenza dei condensatori comuni, la sottigliezza dello strato di ossido consente di ottenere molta più capacità in poco spazio, ma per contro occorre adottare particolari accorgimenti per conservare l'ossido stesso: in particolare è necessario rispettare una precisa polarità nella tensione applicata, altrimenti l'isolamento cede e si ha la distruzione del componente.

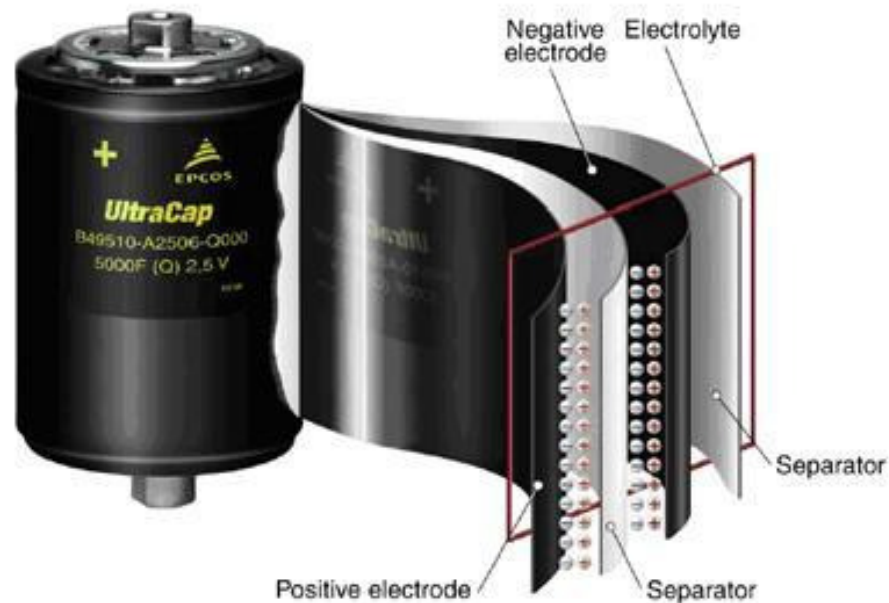


Figura 1.5: supercondensatore con sua struttura interna

L'altro sistema di accumulo di tipo elettrostatico che verrà esaminato brevemente sono i supercondensatori, essi saranno anche oggetto delle simulazioni svolte nei capitoli successivi.

La struttura di un supercondensatore è molto simile a quella di un condensatore normale e il suo obiettivo è di rendere la capacità più elevata possibile, per questo motivo le armature sono sottilissime e ricoperte di un materiale poroso che aumenta la superficie.

Anche il materiale isolante separatore è sottilissimo per diminuire la distanza tra le armature esso è inoltre caratterizzato da una ϵ molto alta.

Il risultato è una capacità che raggiunge valori dell'ordine dei kF.

Di negativo la tensione applicabile è inferiore a quella dei condensatori normali vista la minore distanza tra le armature.

I supercondensatori funzionano, similmente ai condensatori normali, generando un campo elettrico tra le armature e facendo depositare le cariche su di esse.

Come gli accumuli elettrochimici anche i supercondensatori sono caratterizzati da uno spostamento di ioni nell'elettrolita, al contrario degli accumuli elettrochimici però, gli ioni non reagiscono ma si depositano sullo strato di materiale poroso presente sulle armature.

Proprio per questa impossibilità di reazioni chimiche tra gli ioni e gli elettrodi le cariche degli ioni non possono ricombinarsi con quelle presenti negli elettrodi e si forma così un equilibrio elettrostatico.

I supercondensatori utilizzano quindi come accumulo l'energia accumulata tra gli elettrodi e l'elettrolita.

LE PRINCIPALI DIFFERENZE TRA I SISTEMI DI ACCUMULO

In seguito a quanto discusso sui sistemi di accumulo di tipo elettrochimico ed elettrostatico si vogliono esaminare ora brevemente le differenze tecniche e applicative dei due sistemi.

Energia specifica e potenza specifica: proprio qui sta la maggiore differenza tra i due tipi di accumulo, gli accumuli elettrostatici infatti, non essendo caratterizzati da reazioni chimiche, sono molto più rapidi a trasferire energia e sono caratterizzati da una potenza specifica decisamente più elevata di quelli elettrochimici.

Di contro l'energia immagazzinabile in sistemi elettrostatici non è così elevata come quella dei sistemi elettrochimici che per quanto riguarda l'energia specifica risultano decisamente migliori.

Numero di cicli carica-scarica: non essendo caratterizzati da reazioni chimiche i sistemi di accumulo elettrostatici tendono a subire meno l'usura e quindi a

sopportare molto meglio cicli di lavoro numerosi rispetto agli accumuli di tipo elettrochimico.

Efficienza: anche in questo caso gli accumuli di tipo elettrostatico risultano migliori, tendono infatti a sviluppare meno calore o altre perdite durante il loro funzionamento.

Autoscarica: in questo caso sono gli accumuli elettrochimici a risultare vincenti, un accumulo di tipo elettrostatico infatti se non utilizzato si scarica da solo molto più velocemente.

Dimensioni e peso: generalmente gli accumuli di tipo elettrostatico sono meno ingombranti degli accumuli di tipo elettrochimico, soprattutto considerando le celle a combustibile.

Viste le differenze tecniche quelle applicative risultano immediate: i sistemi di accumulo di tipo elettrochimico risultano migliori nel caso si voglia immagazzinare una grande quantità di energia da utilizzare in tempi lunghi mentre i sistemi di accumulo di tipo elettrostatico sono più indicati per utilizzi brevi, frequenti e con potenze anche elevate.

Gli accumuli elettrochimici trovano applicazione ad esempio negli UPS cioè quei sistemi con il preciso scopo di garantire l'alimentazione a utilizzatori per cui questa è indispensabile anche in caso di guasto, questi possono essere ad esempio ospedali, centri di calcolo o servizi bancari.

I sistemi di accumulo di tipo elettrostatico invece vanno sicuramente meglio per i casi delle simulazioni di questa tesi.

Infatti nella prima simulazione si effettua il peak shaving che necessita di molta potenza, così facendo le correnti e le cadute di tensione saranno certamente inferiori migliorando la qualità complessiva del sistema.

Nella seconda simulazione verrà considerata anche l'efficienza del sistema in un caso di carico con frenatura, dove l'accumulo si incaricherà di recuperare tale energia. I cicli di lavoro sono brevi e quindi suggeriscono anche in questo caso un utilizzo degli accumuli di tipo elettrostatico.

Nella terza simulazione l'accumulo si incaricherà di ridurre i disturbi dati da un carico mentre nella quarta dovrà ridurre un disturbo dato dalla generazione: anche questi casi necessitano di interventi rapidi e portano a una preferenza per l'accumulo elettrostatico.

In particolare, come anticipato, per le simulazioni verranno impiegati supercondensatori piuttosto che condensatori elettrolitici: nonostante abbiano una potenza specifica un po' più bassa hanno capacità (e quindi energia accumulabile) decisamente più elevata.

IL FLICKER

Il flicker sarà oggetto della terza simulazione di questa tesi, esso è un noto fenomeno causato dalle variazioni di tensione di alimentazione che provoca lo sfarfallio delle lampade ad incandescenza con gli ovvi inconvenienti.

In questa tesi si vuole vedere che effetto ha un sistema di accumulo opportunamente tarato su questo fenomeno, a tale scopo si impiegherà un flickermetro che verrà ora brevemente spiegato in modo teorico per rendere più chiaro il relativo modello in Simulink.

IL FLICKERMETRO

Il flickermetro è descritto dalla norma CEI EN 61000-4-15 e a essa faremo riferimento per spiegarne brevemente la sua struttura.

La struttura del flickermetro è divisa in 5 diversi blocchi.

Blocco 1 - Adattatore di tensione d'ingresso e circuito di verifica della taratura: in questo blocco le misure del flicker sono rese indipendenti dal livello della tensione d'ingresso e vengono espresse come rapporto percentuale, vengono inoltre fissati opportuni campi di tensione d'ingresso in modo da mantenere il segnale d'ingresso all'adattatore entro la gamma di valori ammessi dallo strumento.

Blocco 2 - Demodulatore quadratico: lo scopo di questo blocco è di estrarre la fluttuazione di tensione elevando al quadrato la tensione d'ingresso riportata al livello di riferimento, simulando così il comportamento della lampada.

Blocco 3 – Primo filtro: elimina la componente continua e quella di frequenza doppia di quella di rete dalla tensione di uscita del demodulatore quadratico.

Blocco 4 – Secondo filtro: simula la risposta in frequenza alle fluttuazioni sinusoidali di tensione di una lampada riempita di gas inerte con filamento spiralizzato, seguita dall'occhio umano. L'uscita di questo blocco rappresenta la sensazione istantanea di flicker.

Blocco 5 – Analisi statistica in tempo reale: da questo blocco si ottiene la funzione di probabilità cumulata utilizzata nel metodo statistico di analisi "livello-durata", da cui si possono ottenere statistici significativi come: la media, lo scarto quadratico, la percentuale di tempo durante la quale un determinato livello di flicker viene superato.

IL BUCO DI TENSIONE

Il buco di tensione è definito dalla norma CEI 100-22 come una diminuzione improvvisa della tensione di alimentazione (valore efficace) ad un valore compreso tra il 90 e l'1% della tensione dichiarata, seguita da un ripristino dopo un breve periodo di tempo.

La tensione dichiarata della definizione della norma è generalmente la tensione nominale mentre, convenzionalmente, la durata di un buco di tensione è compresa tra 10 ms e 1 min.

Il buco di tensione sarà oggetto della quarta simulazione dove si vedrà come un sistema di accumulo posto in prossimità del carico può compensare questo malfunzionamento.

CAPITOLO 2:

Il caso di studio e la logica di controllo adottata

In questo capitolo verrà illustrata la rete oggetto di studio modellizzata in Simulink e verranno effettuati i dimensionamenti delle grandezze elettriche comuni a tutte e quattro le simulazioni.

Sempre in questo capitolo verrà poi spiegato, attraverso degli schemi semplici, il funzionamento del modello realizzato.

Il modello in Simulink vero e proprio è invece spiegato dettagliatamente nell'appendice.

IL CASO DI STUDIO

Il caso di studio sviluppato può essere semplicemente schematizzato come segue in figura 2.1:

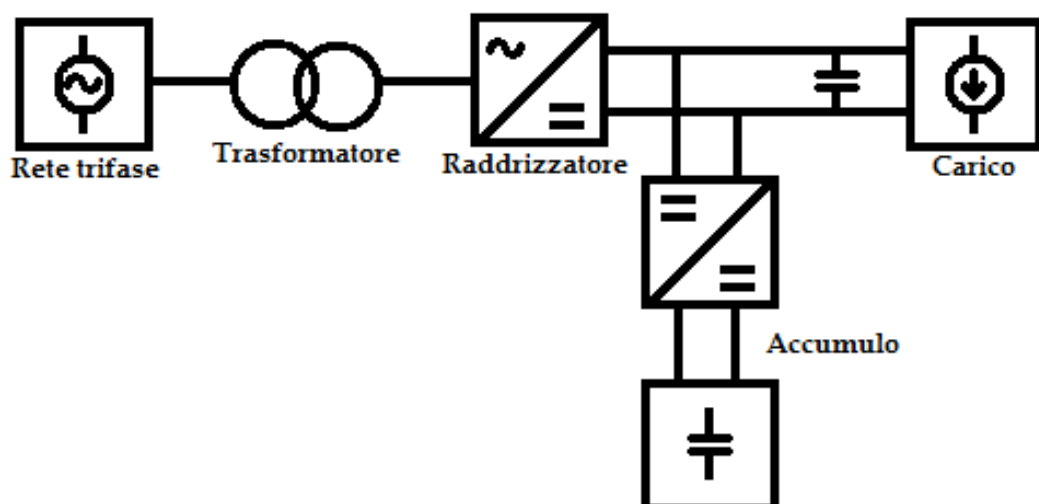


Figura 2.1: schema concettuale

La rete di alimentazione è trifase e la consideriamo per semplicità di potenza infinita con una tensione nominale di 400V.

Il lato in c.a. dello schema è tutto in bassa tensione con tensione nominale di 400V sia prima che dopo il trasformatore trifase che ha quindi scopo unicamente protettivo, un $k=1$ e $A_n=160\text{kVA}$.

Il raddrizzatore/invertitore trifase è bidirezionale essendo composto da interruttori statici, tuttavia, al fine delle simulazioni, si utilizza come unidirezionale per il fatto che si preferisce evitare di trasferire energia non richiesta alla rete di alimentazione.

Il convertitore dell'accumulo è ovviamente bidirezionale e come tale viene impiegato.

La tensione nominale lato alternata e la potenza nominale del trasformatore sono state scelte considerando dei valori tipici di tali grandezze nelle reti di bassa tensione.

La tensione nominale lato continua sul carico è di 600V, questa tensione è stata scelta più alta di quella lato alternata perché se così non fosse non potrei controllare il convertitore tra le due reti.

La tensione nominale lato continua sull'accumulo deve invece permettere variazioni in funzione dello stato di carica dell'accumulo: si sceglie quindi una tensione che varia tra 150 e 300V con tensione nominale di 240V.

L'accumulo non ha un valore di capacità prestabilito perché dovrà operare con diversi carichi che hanno esigenze diverse, il dimensionamento della capacità dell'accumulo sarà quindi trattato successivamente per ogni situazione.

Il valore di tensione massima dell'accumulo di 300V è un limite dettato per questioni costruttive dei supercondensatori, se tale limite dovesse essere superato potrebbero verificarsi dei guasti.

Il valore di tensione minima di 150V invece, è deciso per evitare un'eccessiva scarica del sistema di accumulo, che scendendo con la tensione richiede correnti sempre più alte fornendo sempre meno energia.

Poiché l'energia dei condensatori dipende dal quadrato della tensione, l'energia residua ancora immagazzinata a 150V è pari solo al 25% di quella massima a 300V.

Considerando il valore nominale scelto di 240V si nota che la variazione di tensione tollerata in aumento è inferiore a quella tollerata in diminuzione: il motivo di ciò è

che la logica utilizzata per la scelta di questi valori è a pari differenza di energia piuttosto che di tensione.

Questa differenza si può facilmente verificare con la formula:

$$\Delta W = (1/2) * C * (V_h^2 - V_l^2)$$

Considerando solo il termine di differenza quadratica tra le tensioni abbiamo:

$$300^2 - 240^2 = 32400$$

$$240^2 - 150^2 = 35100$$

Che sono valori simili anche se non identici, lo scarto è dovuto all'arrotondamento del valore di capacità.

In questo modo, come si vede dai valori, avremo una differenza energia un po' più grande a scaricare, ciò va bene visto che l'accumulo è molto più probabile che sia soggetto a brusche scariche piuttosto che a brusche cariche.

Le differenze di energia, quando rapportate tra loro, sono indipendenti dalla capacità, cosa che permette di stabilire in modo indipendente da essa questi valori di tensione.

LA LOGICA DI CONTROLLO

Lo schema realizzato è concettualmente e strutturalmente diviso in 5 parti, esse verranno trattate separatamente spiegando anche le interazioni che le legano tra di loro.

Tali parti possono essere così divise:

- Schema della rete in continua
- Schema dell'accumulo
- Regolatore dell'accumulo
- Regolatore della rete (in alternata)
- Schema della rete in alternata

Lo schema in Simulink completo diviso in queste 5 parti è mostrato in figura 2.2.

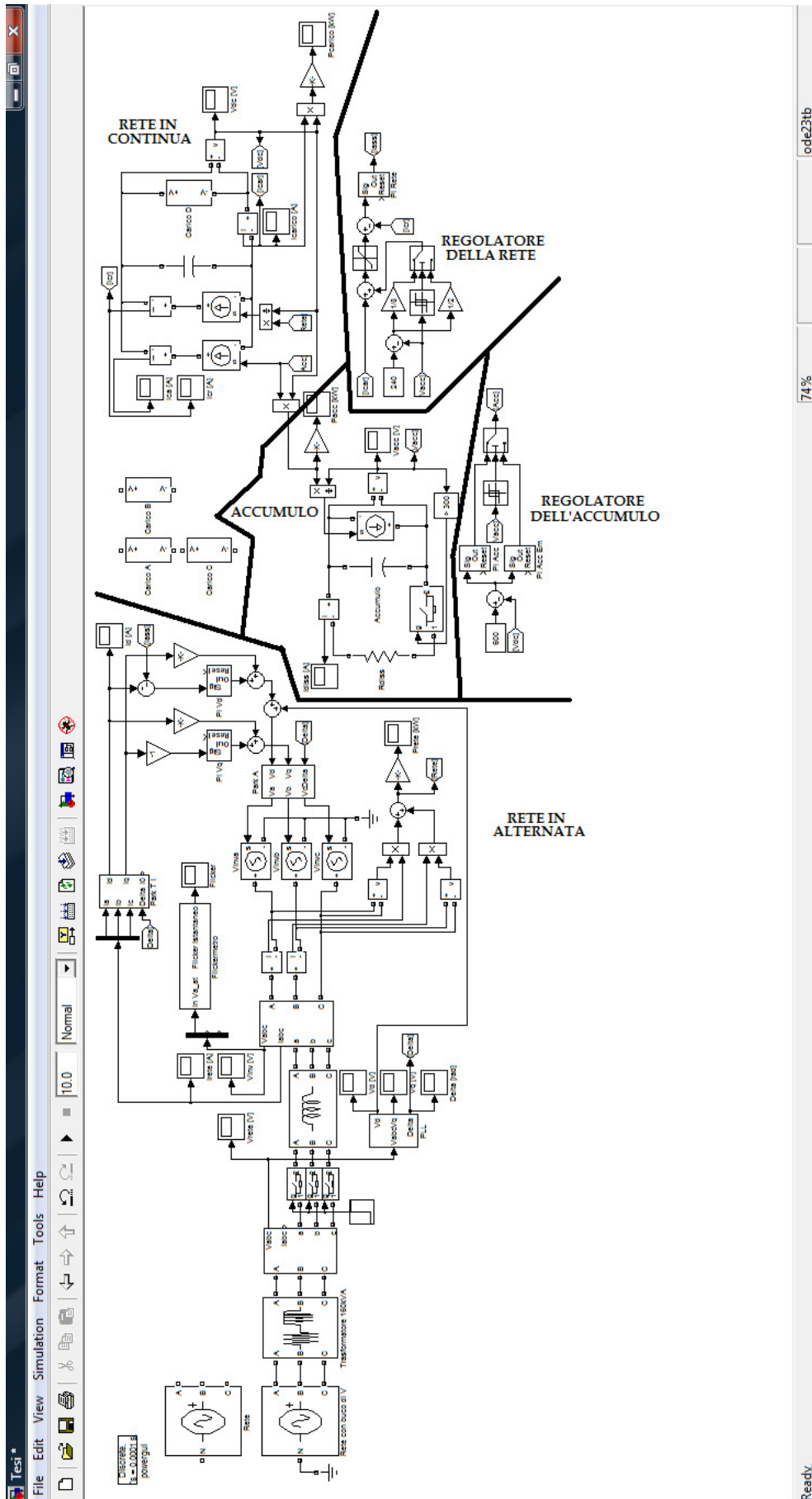


Figura 2.2: schema Simulink completo

LO SCHEMA DELLA RETE IN CONTINUA

La prima parte trattata è la rete lato continua, per rete lato continua si intende tutta la rete a 600V fino ai convertitori elettronici di potenza che la collegano alla rete in alternata e al sistema di accumulo.

La parte in continua lato accumulo a 240V dal convertitore in poi è trattata nel paragrafo "schema dell'accumulo".

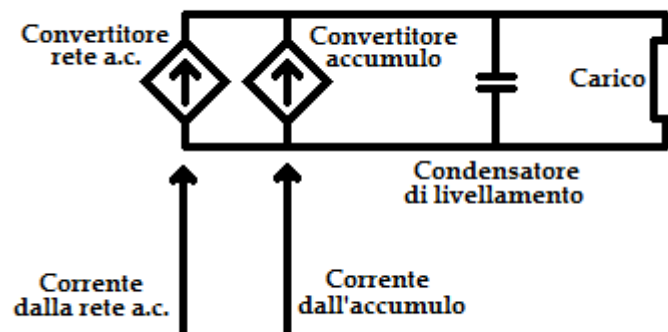


Figura 2.3: schema concettuale della rete in continua

Lo schema concettuale della rete in continua è principalmente composto dal carico, dal condensatore di livellamento e dai due convertitori lato continua a 600V.

Poiché a seconda dei casi il carico sarà diverso, (in particolare i carichi modellizzati e utilizzati sono quattro, ognuno caratterizzato da un diverso assorbimento di potenza) la sua natura sarà discussa all'inizio della rispettiva simulazione.

Generalmente i carichi sono modellizzati a resistenza costante (ci sono però delle eccezioni) e la loro potenza assorbita ha solitamente un valore nominale di 50kW.

Tutti questi carichi hanno comunque in comune la tensione nominale che è la stessa della rete in continua ossia 600V.

Il condensatore che serve per il livellamento della tensione dopo l'invertitore è già carico a 600V e ha un valore di 1mF.

Il valore di capacità di 1mF è stato scelto per ottenere una variazione di tensione inferiore al 4% in caso di frequenza di switching dell'invertitore di 4kHz e resistenza del carico di $7,2\Omega$ (che corrisponde a una potenza di 50kW e una tensione di 600V).

I due convertitori lato continua a 600V sono modellizzati come generatori pilotati di corrente: ciò consente di semplificare il modello e ignorare fenomeni come le perdite di commutazione.

I segnali pilotanti di tali generatori sono forniti dai rispettivi regolatori, spiegati nei relativi paragrafi.

Infine vengono effettuate delle misure di tensione e corrente, queste sono fondamentali per la regolazione e per vedere l'andamento delle varie grandezze elettriche.

Le misure effettuate inoltre permettono il calcolo di altre grandezze come ad esempio le potenze.

LO SCHEMA DELL'ACCUMULO

La seconda parte trattata è la rete in continua lato accumulo, cioè tutto ciò che viene dopo il convertitore dell'accumulo.

Come precedentemente annunciato questo lato del convertitore lavora a una tensione di regime di 240V con variazioni consentite tra i 150V e i 300V.

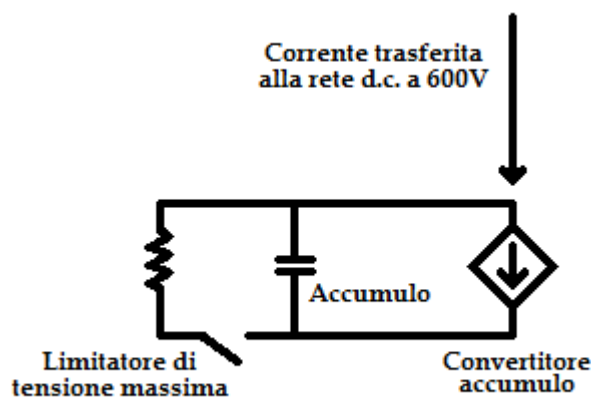


Figura 2.4: schema concettuale dell'accumulo

Lo schema concettuale dell'accumulo è composto dal sistema di accumulo stesso, dal limitatore di massima tensione e dal convertitore dell'accumulo lato 240V.

L'accumulo è rappresentato con una capacità precaricata a un livello di tensione che varia a seconda della simulazione.

Come anticipato il valore di tale capacità è diverso in base al carico utilizzato e verrà calcolato nei singoli casi nei relativi capitoli.

Il convertitore è anche qui rappresentato attraverso un generatore pilotato di corrente, la sua pilotante è fornita sempre dal regolatore dell'accumulo.

L'ultimo elemento principale della rete in continua a 240V è il limitatore di massima tensione: esso è rappresentato come un interruttore con una piccola resistenza in serie collegati in parallelo all'accumulo.

Il funzionamento del limitatore è molto semplice: quando la tensione dell'accumulo supera i 300V l'interruttore, normalmente aperto, si chiude e dissipa l'energia in eccesso.

Quando la tensione è tornata sotto i 300V l'interruttore si riapre.

L'intervento di questo limitatore rappresenta uno spreco di energia, cosa che si vorrebbe evitare. Il superamento dei 300V rappresenta però una condizione di emergenza, nel normale funzionamento ciò non accade mai.

Anche qui le misure sono necessarie: il limitatore di massima tensione, ad esempio, per decidere se intervenire o no compara la tensione misurata sull'accumulo con il valore di 300V.

IL REGOLATORE DELL'ACCUMULO

Il primo dei due regolatori presenti è il regolatore dell'accumulo: il suo scopo è stabilire quanta potenza l'accumulo deve erogare o assorbire in ogni istante di tempo.

Il regolatore dell'accumulo nella realtà è quello che comanda il convertitore posto tra la rete in continua del carico a 600V e quella dell'accumulo a 240V.

Una schematizzazione di tale regolatore è rappresentata in figura 2.5.

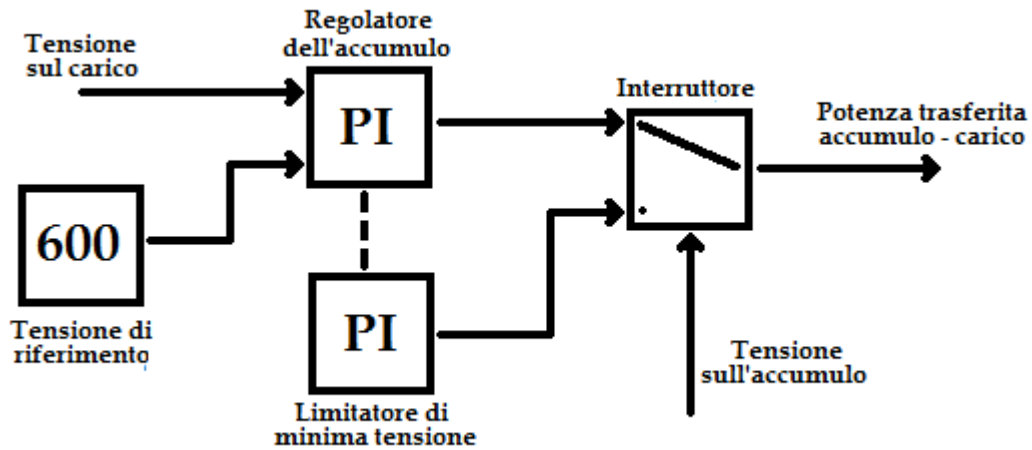


Figura 2.5: schema concettuale del regolatore dell'accumulo

Il regolatore dell'accumulo ha come scopo il mantenimento della tensione del carico ad un valore il più possibile costante a 600V.

Il regolatore dell'accumulo è un regolatore di tipo proporzionale integrale.

Esso riceve in ingresso la tensione misurata sul carico e il valore costante desiderato di 600V: tendendo tale regolatore ad azzerare il suo ingresso, fornirà un'uscita che tende a riportare la tensione sul carico a 600V.

L'uscita rappresenta la potenza scambiata tra accumulo e carico e viene utilizzata, dopo le necessarie operazioni, per pilotare entrambi i generatori pilotati di corrente che caratterizzano tale scambio.

I generatori che regolano il trasferimento di potenza tra carico e accumulo si trovano in figura 2.3 il primo e in figura 2.4 il secondo, entrambi denominati come "convertitore accumulo".

Il limitatore di minima tensione agisce sia su questo regolatore sia su quello della rete.

Sul regolatore dell'accumulo, quando la tensione dell'accumulo si abbassa eccessivamente, l'interruttore in figura 2.5 scatta e di fatto sostituisce il regolatore PI con uno di emergenza.

Questo nuovo regolatore di emergenza rimane inserito finché la tensione sull'accumulo è risalita a livelli accettabili.

Le costanti caratteristiche dei regolatori PI (K_p e K_i) regolano la velocità del regolatore: tanto più il K_p è elevato tanto più il regolatore riesce a ridurre

l'ampiezza delle variazioni delle grandezze in ingresso, tanto più è alto il K_i tanto più il regolatore riuscirà ad azzerare rapidamente tali variazioni.

Per stabilire tali costanti si utilizza la banda passante assegnata al rispettivo regolatore, su di essa non si svolgeranno particolari considerazioni o approfondimenti.

I valori di tali costanti verranno discussi nelle relative simulazioni.

Comunque il regolatore di emergenza è caratterizzato da costanti molto più lente di quello normale, in modo da impedire un'eccessiva cessione di energia.

Il limite di tensione minimo è meno stringente di quello di tensione massima visto che non si rischia di danneggiare componenti della rete e non è quindi netto come l'altro.

IL REGOLATORE DELLA RETE

Il secondo dei due regolatori presenti è il regolatore della rete: il suo scopo è stabilire quanta potenza la rete di alimentazione in alternata deve cedere.

Il regolatore della rete nella realtà è quello che comanda il raddrizzatore posto tra la rete in alternata e quella in continua del carico a 600V.

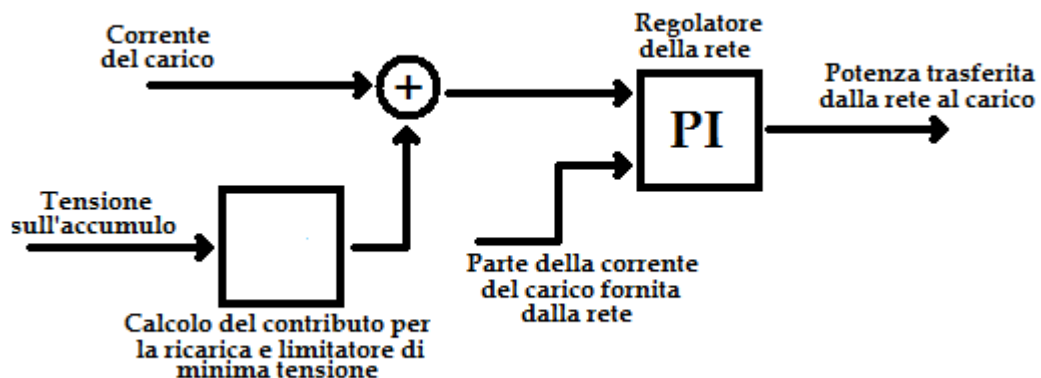


Figura 2.6: schema concettuale del regolatore della rete

Il regolatore della rete ha come scopo l'inseguimento della corrente del carico, in modo che a regime la corrente in uscita dal raddrizzatore sia uguale a quella del carico.

Anche il regolatore della rete è un regolatore di tipo proporzionale integrale.

Esso riceve in ingresso la corrente misurata sul carico e la corrente in uscita dal raddrizzatore: tendendo tale regolatore ad azzerare il suo ingresso, fornirà un'uscita che tende a eguagliare la corrente in uscita dal raddrizzatore a quella del carico.

L'uscita rappresenta la potenza trasferita dalla rete in alternata al carico e viene utilizzata, dopo le necessarie operazioni, per pilotare il generatore pilotato di corrente e che caratterizza tale trasferimento e il raddrizzatore nella rete in alternata.

Il generatore che regola il trasferimento di potenza tra rete in alternata e accumulo si trova in figura 2.3 ed è denominato come "convertitore rete a.c.".

Un'ulteriore funzione del regolatore della rete è quella di ricaricare l'accumulo quando la sua tensione si trova sotto i 240V.

A tal fine viene prelevata la tensione sull'accumulo e, dopo alcune operazioni di comparazione e pesatura, viene mandato un contributo aggiuntivo alla corrente del carico vista dal regolatore.

L'aumento (o la diminuzione) di potenza richiesta alla rete sarà tanto maggiore quanto maggiore è la differenza tra il valore di tensione dell'accumulo e i 240V di riferimento.

In particolare la massima potenza richiedibile in più per la ricarica dell'accumulo è scelta di 6,75kW, cioè il 13,5% della nominale.

Questo valore è difficilmente raggiungibile perché è quello corrispondente a una tensione sull'accumulo di 150V.

Scegliendo un valore di questo tipo come massimo avremo che solitamente il contributo sarà intorno ai 5kW cioè al 10%.

Il limitatore di minima tensione in questo regolatore ha l'effetto di aumentare significativamente questo contributo, in modo che quando l'accumulo ha poca energia ne venga chiesta di più alla rete.

Anche in questo caso ovviamente, quando la tensione sull'accumulo ritorna a valori accettabili, il contributo richiesto per la ricarica dell'accumulo ritorna al valore standard più basso.

Le costanti del regolatore PI anche in questo caso saranno discusse nelle relative simulazioni.

LO SCHEMA DELLA RETE IN ALTERNATA

L'ultima parte dello schema concettuale del modello riguarda la schematizzazione della rete di alimentazione in alternata.

Come si può vedere dalla figura 2.2 dello schema in Simulink tale parte è la più grande e complessa: in questo paragrafo si vuole spiegarne il funzionamento generale con i suoi elementi più importanti, una descrizione più dettagliata di ogni componente e operazione si può trovare in appendice (questo vale ovviamente anche per le altre parti dello schema concettuale).

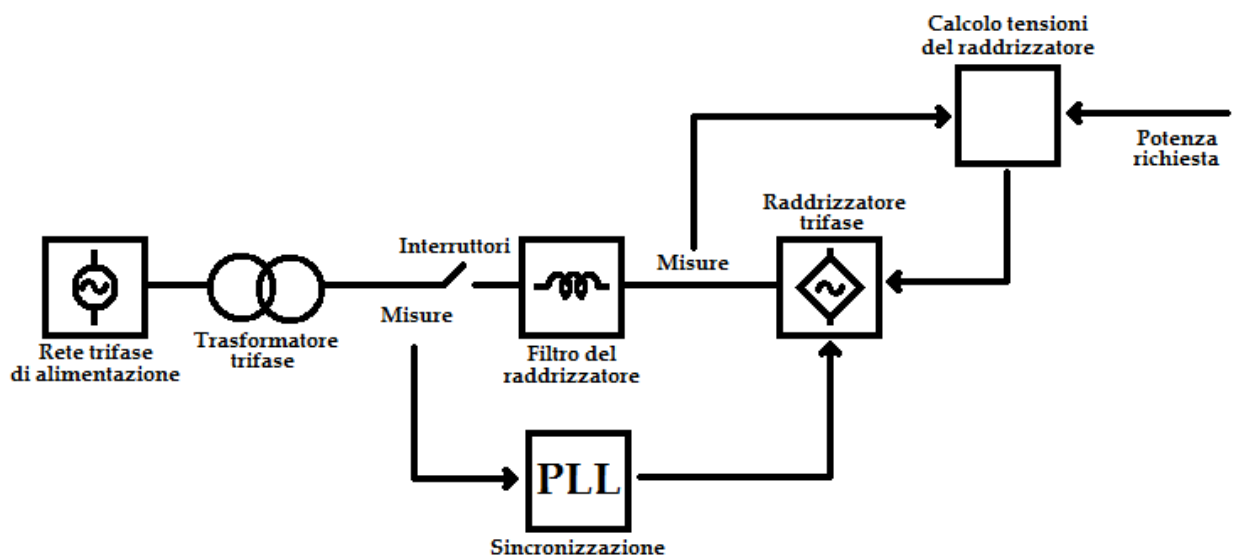


Figura 2.7: schema concettuale della rete in alternata

Lo schema della rete in alternata comprende, oltre alla parte elettrica, anche una parte di controllo piuttosto complessa.

Per quanto riguarda la parte elettrica, il primo blocco a sinistra rappresenta la rete esterna di alimentazione trifase: essa viene considerata senza perdite, con una tensione nominale di 400V e una frequenza nominale di 50Hz.

Subito dopo la rete di alimentazione si trova un trasformatore: esso ha scopo unicamente di isolamento, infatti ha $k=1$ e indice orario pari a 0. Vista la potenza dei carichi da alimentare si è scelta una potenza nominale di 160kVA, una $V_{cc}\%$ del 4% e un $\cos(\varphi)_{cc}$ di 0,3.

Tra il trasformatore e il filtro del raddrizzatore ci sono degli interruttori: essi sono inizialmente aperti e si chiudono una volta che la parte destra e sinistra della rete sono sincronizzate prima di qualsiasi attacco di carico.

La parte destra della rete elettrica è composta dal raddrizzatore trifase lato alternata: esso è composto da un filtro, rappresentato come un induttanza serie trifase con valore di 0,1mH, e un generatore di tensione trifase pilotato.

Sia lato rete esterna di alimentazione sia lato raddrizzatore sono presenti degli strumenti di misura, necessari per la visualizzazione delle grandezze elettriche e per lo svolgimento delle operazioni interne al modello.

Prima di spiegare la parte di controllo è opportuno introdurre brevemente la trasformata di Park.

La trasformata di Park è un'operazione matematica che si può applicare a una terna di tensioni o correnti, essa trasforma le grandezze di fase (a, b, c) in grandezze equivalenti con un nuovo sistema di riferimento: su assi diretto (d), di quadratura (q) e omopolare (0).

Il motivo dell'impiego della trasformata di Park è che essa semplifica i calcoli e permette la scelta di un opportuno sistema di riferimento.

Essendo la terna simmetrica ed equilibrata la componente omopolare non verrà mai considerata essendo essa sempre nulla.

Per fissare gli assi d e q occorre scegliere una specifica pulsazione in relazione a quella della rete: essa è chiamata omega di Park.

L'integrale dell'omega di Park è chiamato delta di Park: questa grandezza rappresenta un angolo ed è quella che utilizzeremo per sincronizzare l'intera rete in alternata.

Il delta di Park viene calcolato nel PLL: esso viene scelto in modo da azzerare la componente di asse in quadratura che rappresenta la potenza reattiva.

Il delta di Park viene poi mandato al raddrizzatore per fare in modo che anche esso generi tensioni in fase con quelle della rete di alimentazione.

L'ampiezza delle tensioni del raddrizzatore viene invece decisa utilizzando come riferimento le tensioni della rete e riducendole leggermente in base alla potenza richiesta dal carico.

Una volta che il raddrizzatore è sincronizzato con la rete, prima di qualsiasi attacco di carico, gli interruptori precedentemente menzionati si chiudono, unendo le due parti della rete in alternata (vedi figura 2.7).

GLI ANELLI DI REGOLAZIONE

In questo paragrafo si vuole illustrare il funzionamento della regolazione dei trasferimenti di potenza di tutto il modello attraverso gli anelli di regolazione.

Gli anelli di regolazione sono due: uno per la potenza trasferita dal convertitore continua/continua dell'accumulo e uno per la potenza trasferita da raddrizzatore trifase tra la rete in alternata e quella in continua a 600V.

In entrambi gli anelli il regolatore vero e proprio è il PI collocato sulla rispettiva parte di regolazione.

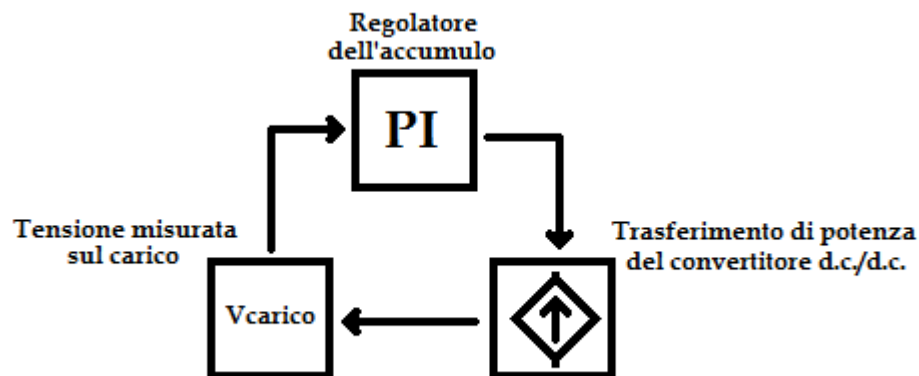


Figura 2.8: anello di regolazione dell'accumulo

Anello di regolazione dell'accumulo: è il più semplice dei due e coinvolge la rete in continua e il regolatore dell'accumulo. Sul carico si misura la tensione che viene inviata al regolatore e il regolatore manda la sua uscita come pilotante dei generatori di corrente che rappresentano il convertitore dell'accumulo.

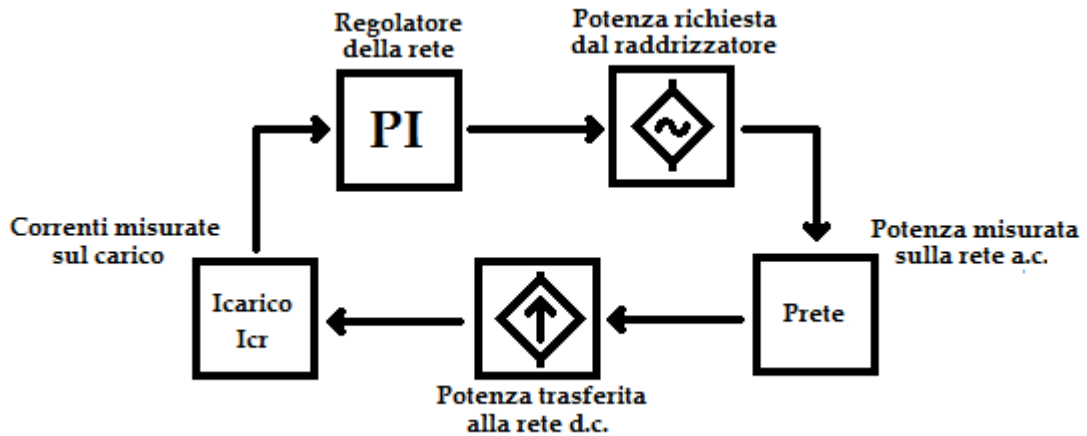


Figura 2.9: anello di regolazione della rete in alternata

Anello di regolazione della rete in alternata: coinvolge la rete in continua, il regolatore della rete e la rete in alternata. Sulla rete in continua si misura la corrente del carico e la sua quota fornita dalla rete in alternata che vengono inviate al regolatore, il regolatore manda la sua uscita come potenza richiesta alla rete in alternata e la rete manda la sua potenza misurata a pilotare il corrispondente generatore di corrente sul carico.

CAPITOLO 3:

La sincronizzazione

La sincronizzazione è una parte fondamentale delle simulazioni, a tale operazione si riserva sempre il primo secondo di simulazione facendo partire tutti i carichi un secondo dopo l'inizio.

Questa operazione è svolta principalmente dal PLL, i suoi ingressi e le sue uscite verranno visualizzati di seguito.

Ai fini della sincronizzazione ci sono due istanti importanti: l'istante iniziale dove la simulazione ha inizio e l'istante $t=0,5s$ dove gli interruttori di sincronizzazione si chiudono (vedi figura 2.7).

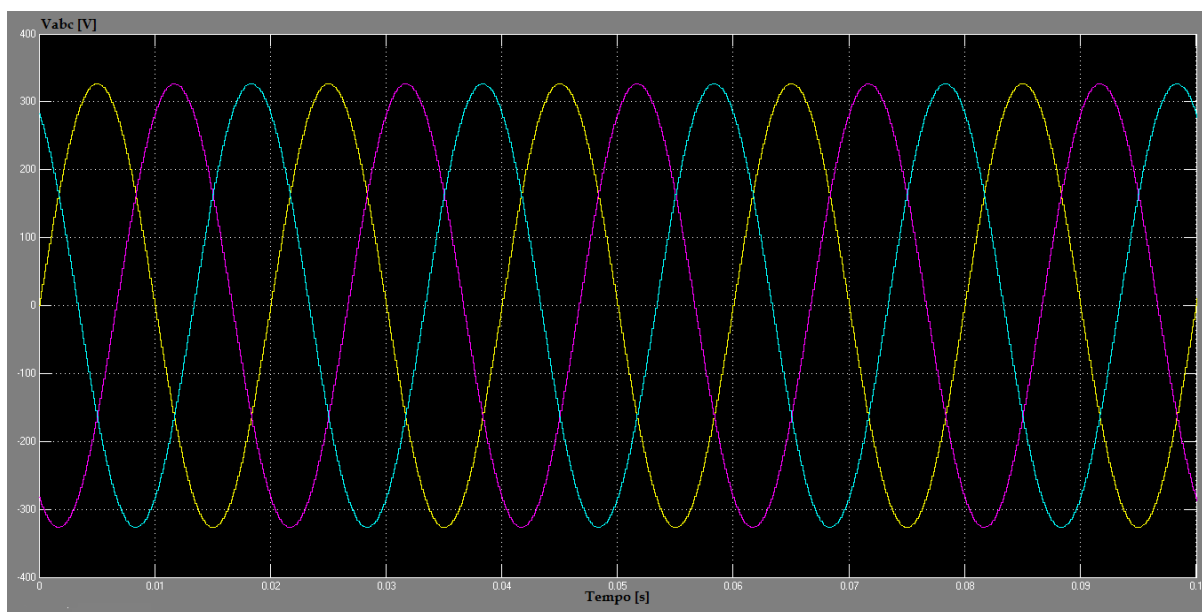


Figura 3.1: tensioni della rete esterna

Le tensioni della rete esterna: in ingresso il PLL riceve le tensioni di fase della rete esterna, tali tensioni sono imposte e, a meno di correnti particolarmente elevate che provocherebbero una significativa ΔV sul trasformatore, hanno un andamento regolare.

Queste tre tensioni costituiscono una terna diretta, nonostante la simulazione della sincronizzazione duri un secondo è stato riportato in figura 3.1 l'andamento solo dei primi 0,1s per permettere una migliore comprensione delle forme d'onda.

Le tensioni della rete esterna non sentono minimamente né il transitorio iniziale né quello di chiusura degli interruttori.

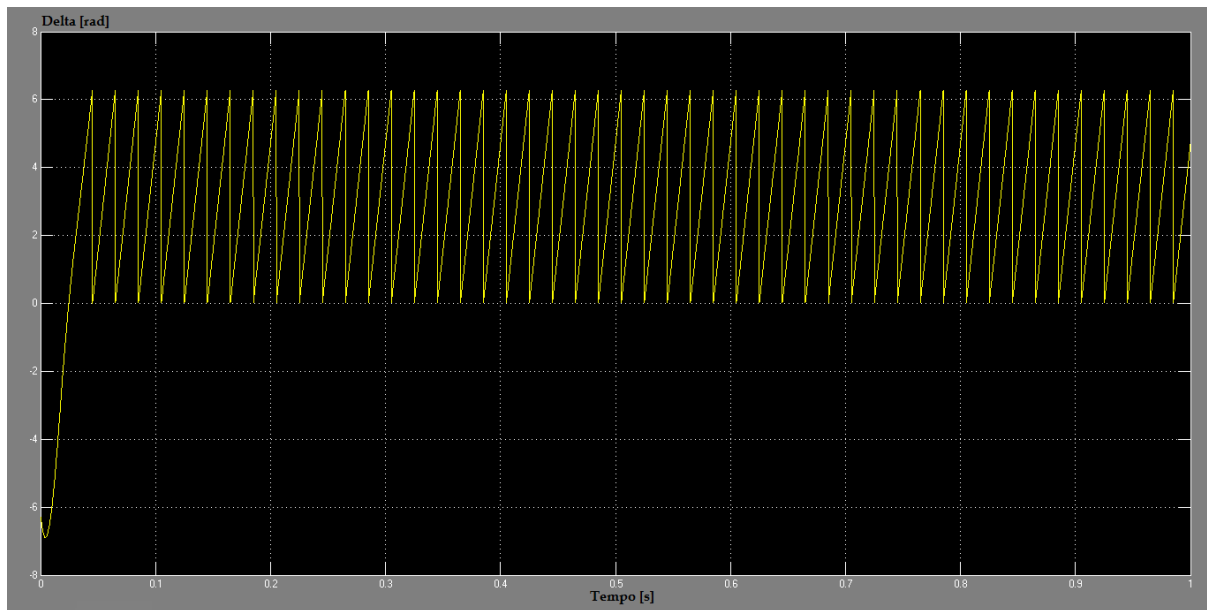


Figura 3.2: delta di Park

Il delta di Park: è l'uscita più importante per la sincronizzazione, come si vede è costituito da rampe crescenti in successione, tali rampe vanno da 0 a 2π .

In questo caso c'è un transitorio iniziale che è comunque esaurito ben prima dell'istante di chiusura degli interruttori.

All'istante $t=0,5s$ non c'è invece alcun transitorio, ciò è prevedibile visto che il delta dipende solo dalle tensioni della rete esterna.

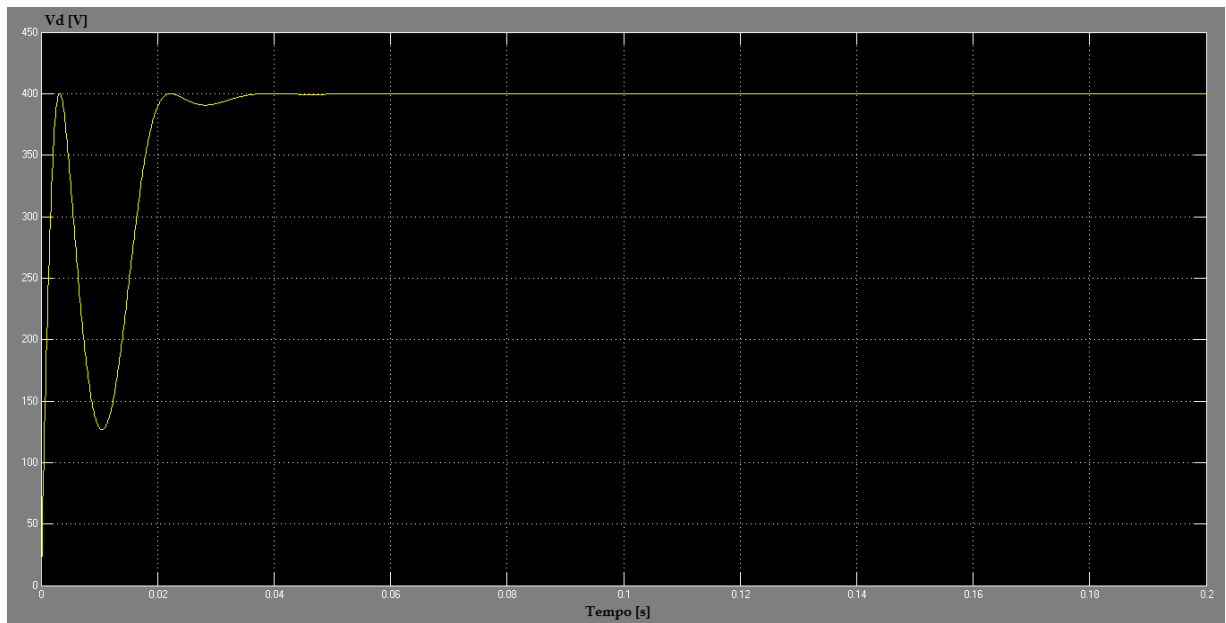


Figura 3.3: tensione Vd della rete esterna

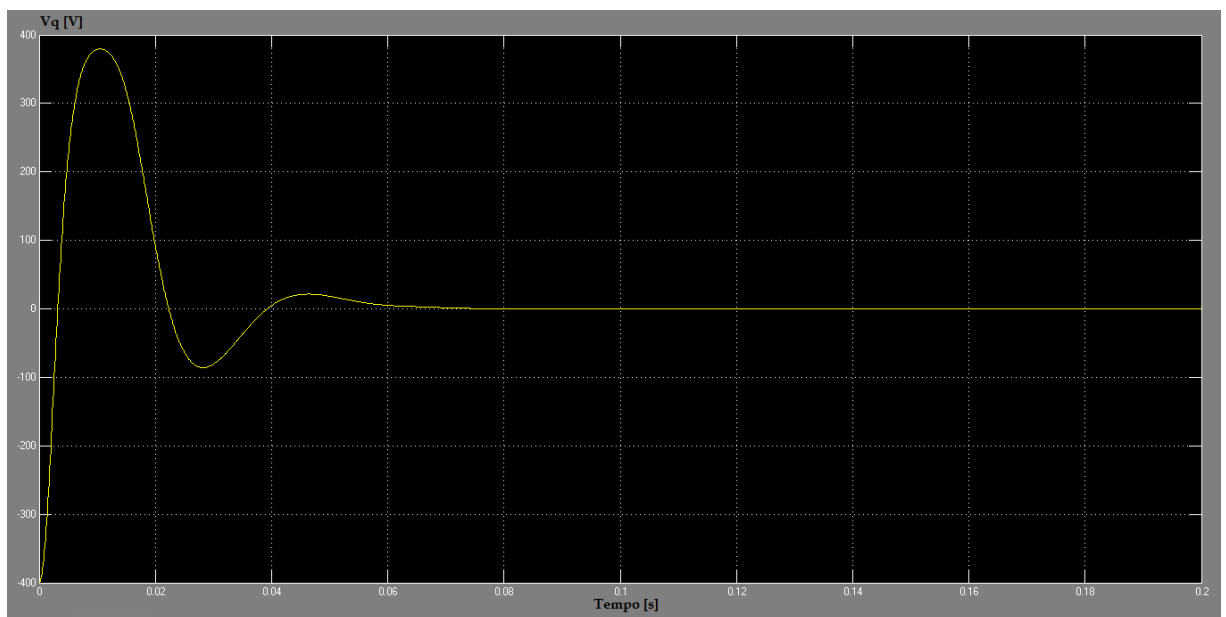


Figura 3.4: tensione Vq della rete esterna

Le tensioni Vd e Vq della rete esterna: sono le altre due uscite del PLL, anche in questo caso il tempo visualizzato è stato ridotto per vedere meglio i transitori iniziali, questa volta a 0,2s.

Dalle figure 3.3 e 3.4 si vede che i transitori iniziali sulle tensioni di Park durano circa 0,1s.

La durata di questi transitori conferma il fatto che la chiusura degli interruttori dopo 0,5s va bene e ha un grande margine di sicurezza.

La tensione V_d si assesta a un valore di 400V mentre la V_q si assesta a 0.

La presenza dei transitori sul delta e sulle tensioni di Park è dovuta ai calcoli svolti dal PLL: le tensioni di rete (come si vede in figura 3.1) non subiscono alcun transitorio reale.

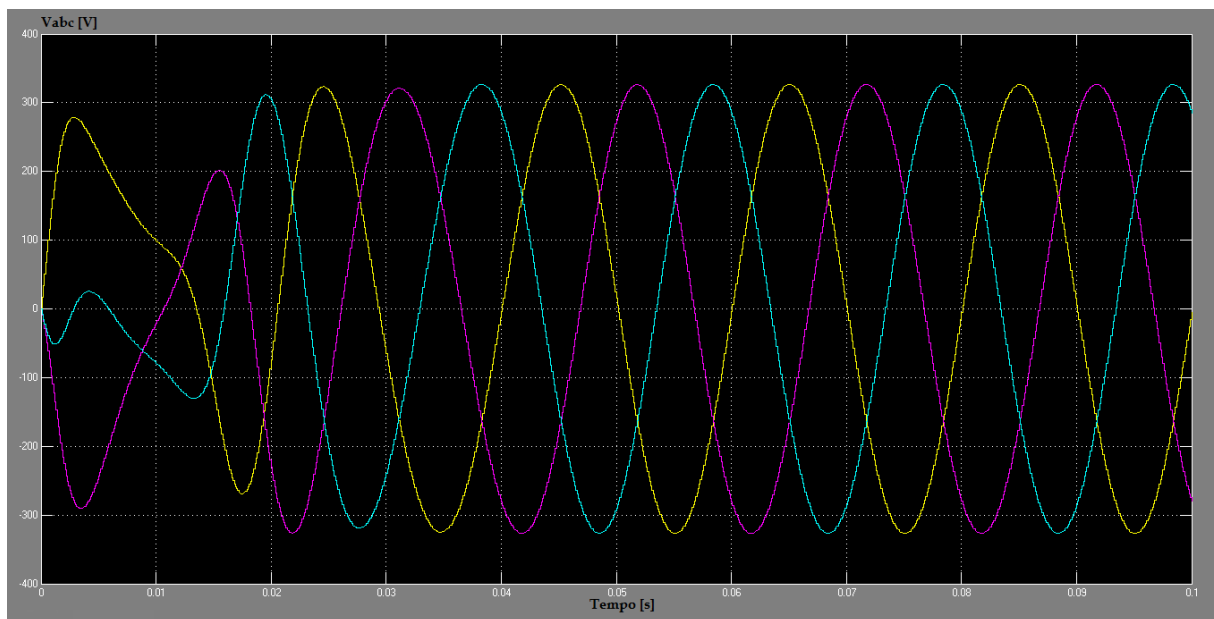


Figura 3.5: tensioni del raddrizzatore

Le tensioni del raddrizzatore: proprio come le tensioni della rete esterna anche queste tendono a formare una terna diretta, al contrario delle altre però, non sono imposte ma vengono generate dal raddrizzatore in seguito a dei calcoli.

Anche in questo caso il tempo visualizzato è solo dei primi 0,1s per vedere meglio l'andamento delle forme d'onda.

Come si vede in figura 3.5 c'è un transitorio iniziale: esso è dovuto ai transitori sul delta e sulle tensioni di Park, non è invece minimamente dovuto alle correnti che, essendo gli interruttori aperti, sono esattamente uguali zero.

Questo transitorio iniziale è di valore contenuto e non supera mai il valore di picco di regime.

All'istante di chiusura degli interruttori non c'è alcun transitorio visibile anche se è ipotizzabile la presenza di un transitorio di vari ordini di grandezza inferiore.

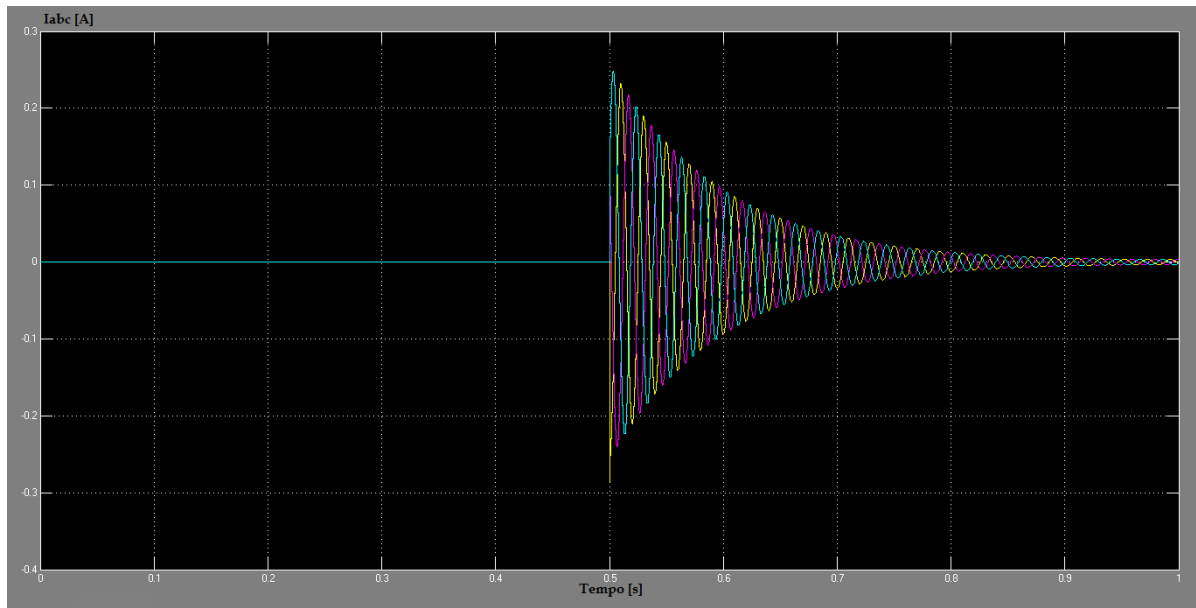


Figura 3.6: correnti

Le correnti: sono l'ultima grandezza esaminata per la sincronizzazione, non essendoci alcun carico il valore teorico è sempre zero.

Come si vede in figura 3.6 il valore iniziale e di regime è zero, proprio come quello atteso, inoltre non c'è alcun transitorio iniziale visto che gli interruttori sono inizialmente aperti.

C'è invece un transitorio all'istante di chiusura degli interruttori che si smorza lentamente, esso è dovuto al fatto che le tensioni di rete esterna e raddrizzatore non sono esattamente uguali.

Dal grafico si legge che il picco del transitorio arriva a un valore massimo di 0,3A, se confrontiamo tale valore con il valore di picco di regime delle correnti che assume valori dell'ordine dei 10^1 fino ai 10^2 A si nota che è di 2 o 3 ordini di grandezza inferiori ed è quindi insignificante.

In caso di assenza degli interruttori il transitorio sulle correnti è in grado di raggiungere anche i 3 ordini di grandezza in più rispetto al valore di regime.

CAPITOLO 4:

Simulazione 1: carico con elevata corrente iniziale

La prima simulazione tratta un carico da 50kW che ha una corrente iniziale pari a 4 volte la sua corrente nominale: tale corrente dura 0,5s e dopo questo tempo assume il suo valore nominale fino allo spegnimento.

Questo andamento di potenza è tipico delle apparecchiature radiologiche e di tutti quei carichi che richiedono un'elevata corrente di spunto.

Essendo i modelli in Simulink dei carichi tutti abbastanza simili e di semplice comprensione, verranno direttamente riportati nei relativi capitoli che ne trattano la simulazione invece che in appendice.

Il modello del carico realizzato in Simulink è riportato di seguito.

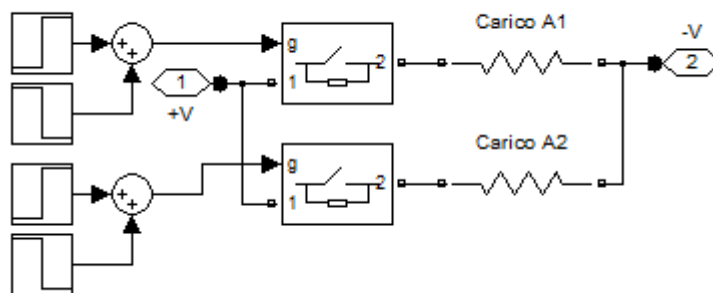


Figura 4.1: carico A

Il modello del carico è piuttosto semplice, i due blocchetti esagonali +V e -V sono i collegamenti esterni rispettivamente positivo e negativo del carico sulla rete in continua.

Per simulare la variazione di corrente si utilizzano due resistenze in parallelo attivate in successione: "Carico A1" e "Carico A2" in figura 4.1.

Il carico è quindi considerato a resistenza costante.

All'istante $t=0$ entrambi gli interruttori sono aperti e la corrente è nulla.

All'istante $t=1s$ l'interruttore del carico A1 si chiude, per simulare la corrente quattro volte superiore è stata quadruplicata la potenza del carico che richiederà quindi 200kW, la resistenza "Carico A1" del modello è di conseguenza un quarto di quella nominale.

All'istante $t=1,5s$ l'interruttore del carico A1 si riapre e nello stesso istante si chiude l'interruttore del carico A2.

Il carico A2 è il carico a regime vero e proprio e ha una potenza di 50kW.

Infine, dopo il tempo desiderato, si riapre anche l'interruttore del carico A2 simulando il distacco di carico.

Per la simulazione faremo avvenire il distacco di carico all'istante $t=12s$.

A fine applicativo possiamo comunque ipotizzare che questo tipo di carico, una volta esaurito l'elevato assorbimento iniziale, possa rimanere in funzione per un tempo anche di diverse ore prima del distacco.

E' comunque bene sottolineare che il carico è in realtà uno solo, la presenza di due resistenze in parallelo è motivata dal fatto che, per semplicità di modellizzazione, una volta terminata l'elevata corrente iniziale si sostituisce la resistenza con una quattro volta maggiore.

Per il controllo degli interruttori si utilizzano dei blocchi gradino, sapendo che il valore 1 sta per "interruttore chiuso" e il valore 0 sta per "interruttore aperto" sommando due blocchi gradino per interruttore si ottiene l'attacco e il distacco di carico.

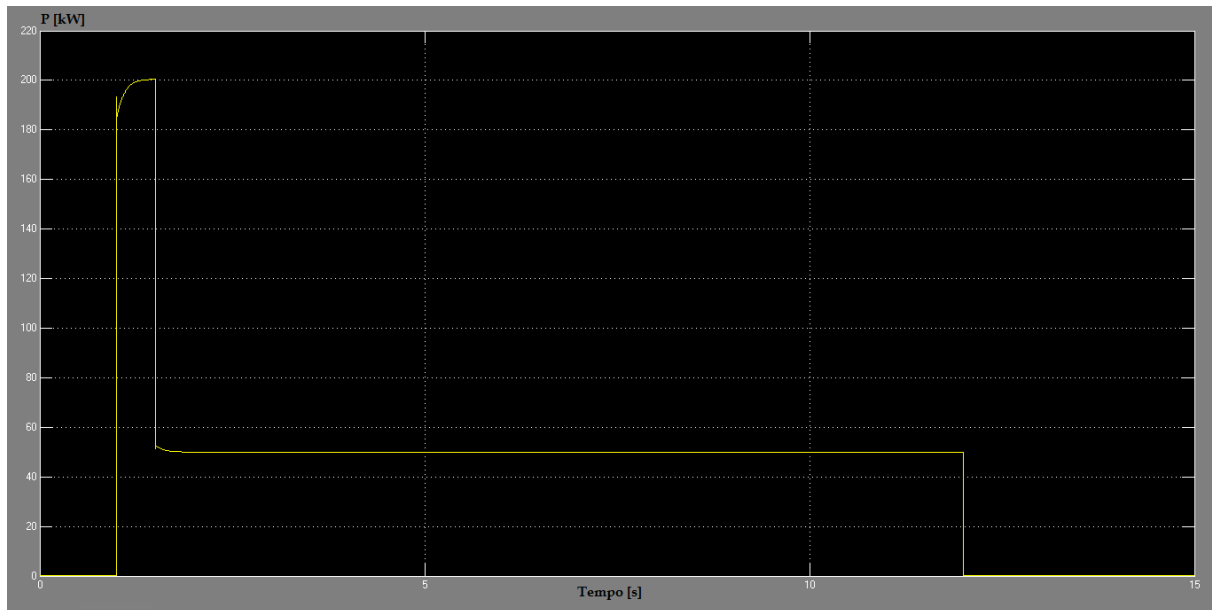


Figura 4.2: andamento della potenza assorbita dal carico A

In figura 4.2 si vede l'andamento della potenza assorbita dal carico A, la durata della simulazione è stata scelta di 15s.

Bisogna ora dimensionare la capacità dell'accumulo: volendo utilizzare supercondensatori il suo valore è meglio sia abbastanza limitato per limitare i costi, si può pensare di scegliere un valore in grado di coprire interamente il picco iniziale.

Inoltre effettuando questa scelta non si è in alcun modo vincolati sulla durata dell'assorbimento del carico dopo il picco iniziale.

L'energia del picco iniziale si trova molto semplicemente come:

$$W_{\text{picco}} = t_{\text{picco}} * P_{\text{picco}} = 0,5[\text{s}] * 200\text{k}[\text{W}] = 100\text{kJ}$$

La ΔV a decrescere ammissibile sull'accumulo è da 240V a 150V, quindi posso calcolare il valore della capacità:

$$C = 2 * W_{\text{picco}} / \Delta V^2 = 2 * 100\text{k} / (240^2 - 150^2) = 5,698\text{F}$$

Che per sicurezza e per avere un valore standard arrotondo a 6F.

Con questo valore di capacità calcolato l'impiego di supercondensatori è compatibile e risulta decisamente la scelta migliore.

Nel seguito sono svolti vari casi in cui si vedrà l'effetto del valore delle costanti K_p e K_i dei due regolatori: la loro corretta taratura è indispensabile per trarre il massimo vantaggio dall'impiego dell'accumulo.

SIMULAZIONE 1, CASO 1: REGOLATORI LENTI

Valuteremo adesso qualitativamente le differenze di prestazioni in funzione della velocità dei due regolatori di rete e accumulo, in questo primo caso i regolatori PI sono entrambi lenti.

Regolatore della rete (banda passante 0,9Hz):

$$K_p=0$$

$$K_i=0,75$$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 130Hz):

$$K_p=1$$

$$K_i=15$$

Risultano immediate due considerazioni:

La prima è il K_p del regolatore della rete pari a 0: in questo modo rimane solo la parte integrale del regolatore, questa scelta è stata fatta per fare in modo che tutto il gradino di potenza negli istanti di brusche variazioni sia coperto dall'accumulo.

La seconda considerazione è che il regolatore dell'accumulo è significativamente più veloce di quello della rete: il motivo è che se il regolatore della rete fosse più veloce o di velocità simile la presenza dell'accumulo sarebbe inutile non potendo esso svolgere la funzione per cui è stato progettato.

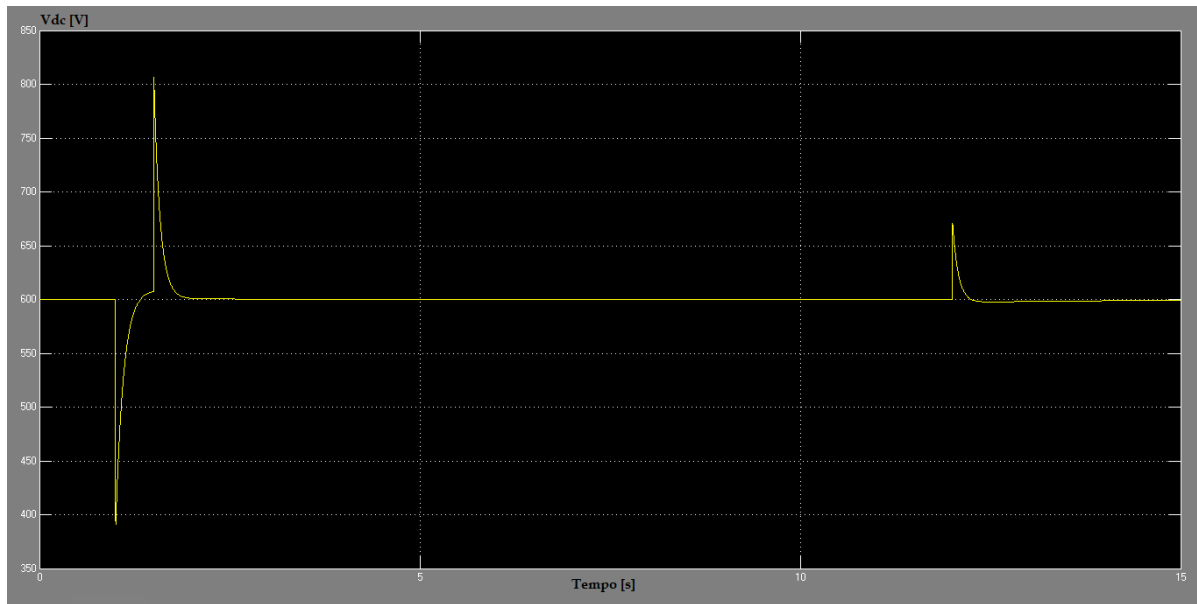


Figura 4.3: tensione lato carico

Come si vede dalla figura 4.3 con i regolatori troppo lenti non si riesce a mantenere costante la tensione sul carico entro i limiti.

Sul doppio transitorio iniziale infatti si arriva sotto i 400V e poi sopra gli 800V, una variazione così elevata non può essere assolutamente accettabile.

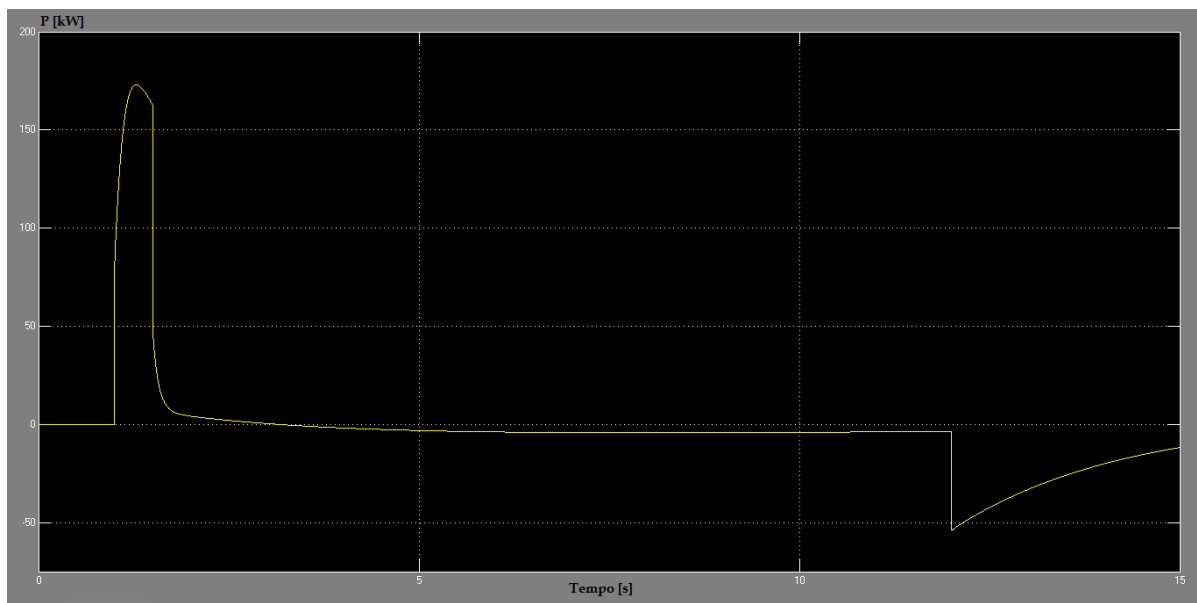


Figura 4.4: potenza fornita dall'accumulo

Un altro problema meno grave collegato al primo è che, essendo l'accumulo troppo lento, non riesce a compensare come dovrebbe tutto il salto di corrente richiesto dal carico.

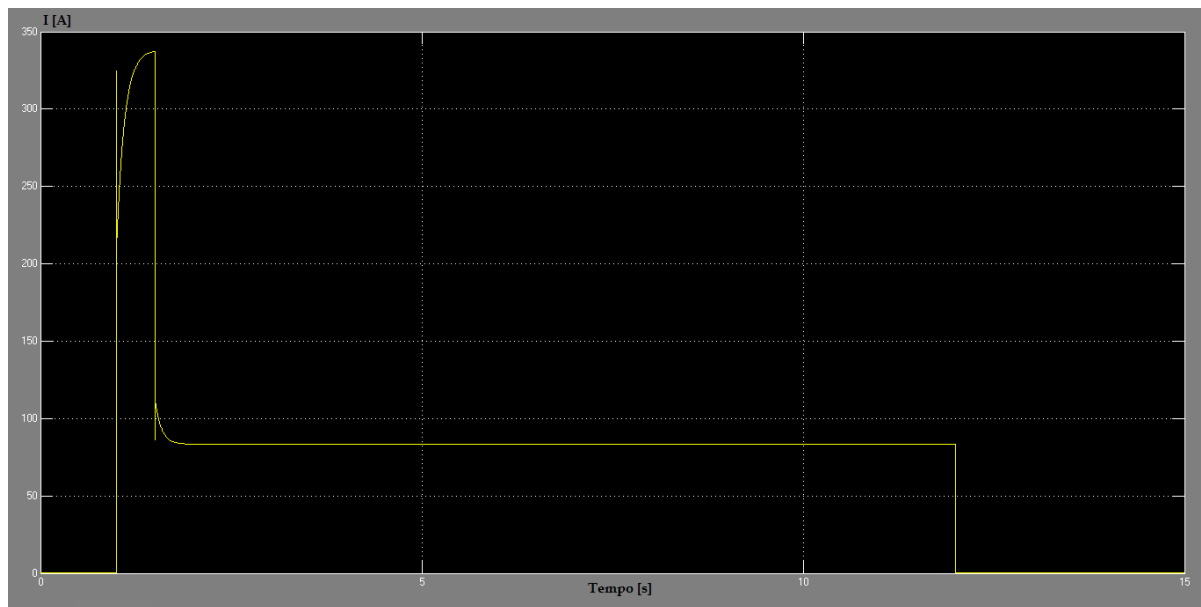


Figura 4.5: corrente del carico

L'ultima grandezza esaminata di questo caso è la corrente del carico: come si vede in figura 4.5 le elevatissime cadute di tensione transitorie provocano sulla corrente delle significative variazioni.

SIMULAZIONE 1, CASO 2: REGOLATORI VELOCI

In questo secondo caso i regolatori PI sono resi entrambi più veloci per compensare il problema delle cadute di tensione troppo elevate del caso precedente.

Regolatore della rete (banda passante 12Hz):

$$K_p=0$$

$$K_i=7,5$$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz):

$K_p=14$

$K_i=150$

Anche in questo caso il K_p del regolatore della rete è mantenuto pari a 0: la scelta di fare in modo che tutto il gradino di potenza negli istanti di brusche variazioni sia coperto dall'accumulo è sempre valida.

Il regolatore dell'accumulo rimane anche esso sempre significativamente più veloce di quello della rete.

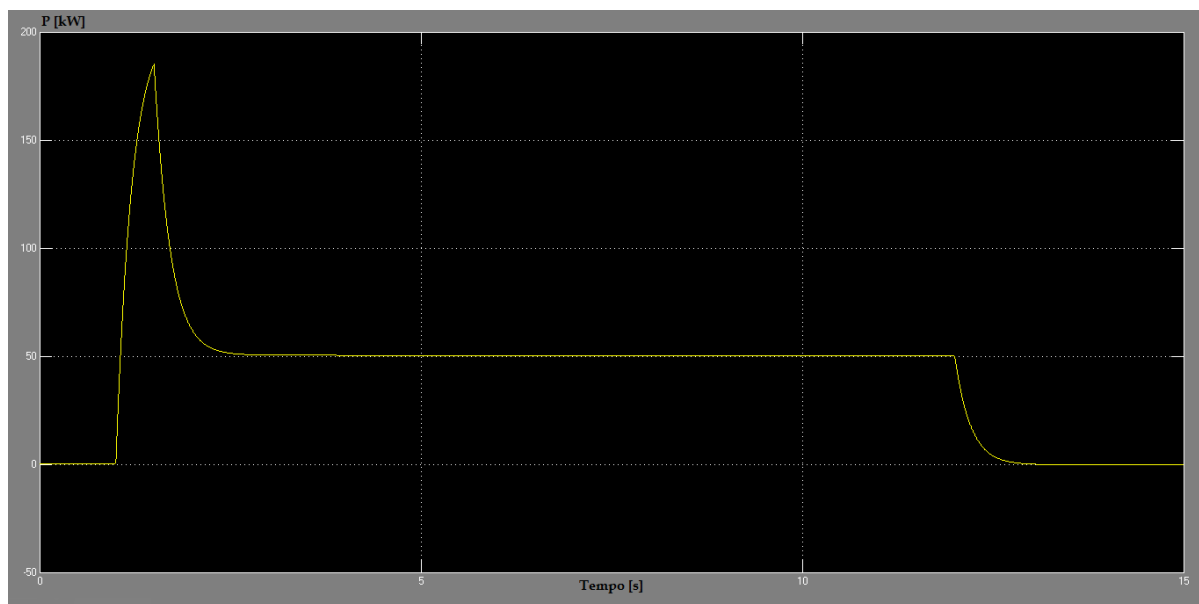


Figura 4.6: potenza assorbita dalla rete

Dalla figura 4.6 si capisce chiaramente perché anche questa soluzione non va bene: infatti la potenza che la rete cede al carico raggiunge quasi i 200kW del picco iniziale che sono il quadruplo della potenza di regime.

In questo modo perdo tutti i vantaggi dell'utilizzo dell'accumulo perché la rete si trova sottoposta ad una richiesta di potenza maggiore.

Inoltre non potrei dimensionare il raddrizzatore per i soli 50kW di regime perché altrimenti si romperebbe.

Si può concludere che, anche se il regolatore dell'accumulo è più veloce di quello della rete, tale differenza dovrà essere ulteriormente accentuata.

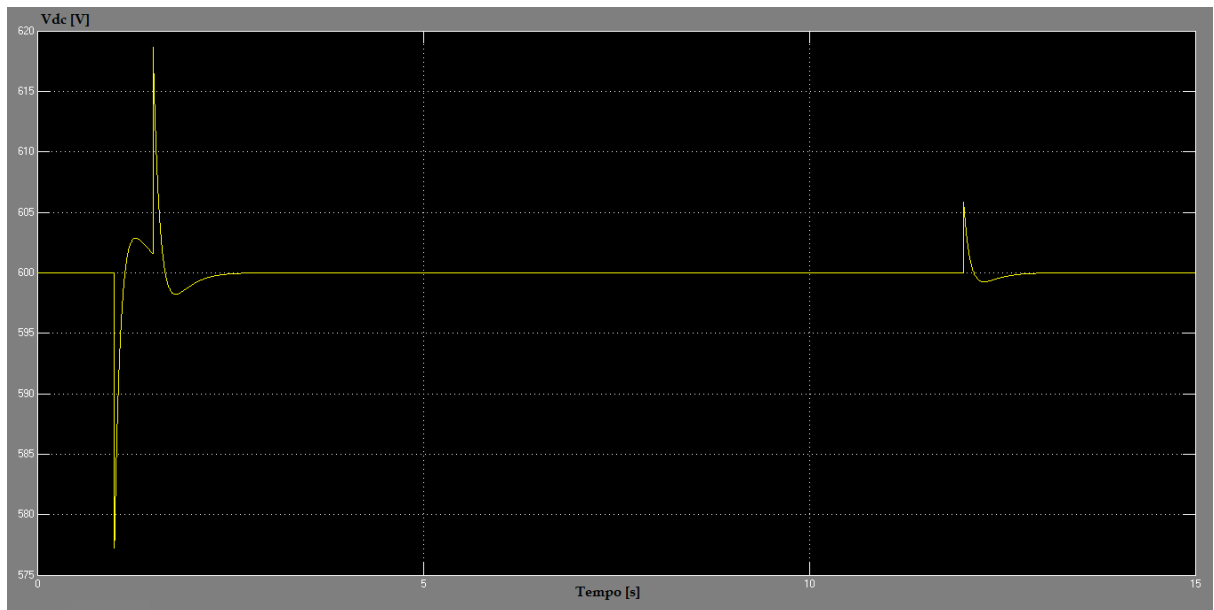


Figura 4.7: tensione lato carico

Come effetto positivo rispetto al caso precedente abbiamo invece il miglioramento della stabilità della tensione sul carico: rispetto a prima infatti l'ampiezza di questi transitori è sensibilmente ridotta e si osserva uno scarto massimo di 23V che rapportati ai 600V nominali causano una caduta inferiore al 4% per durate dell'ordine dei decimi di secondo e quindi accettabili.

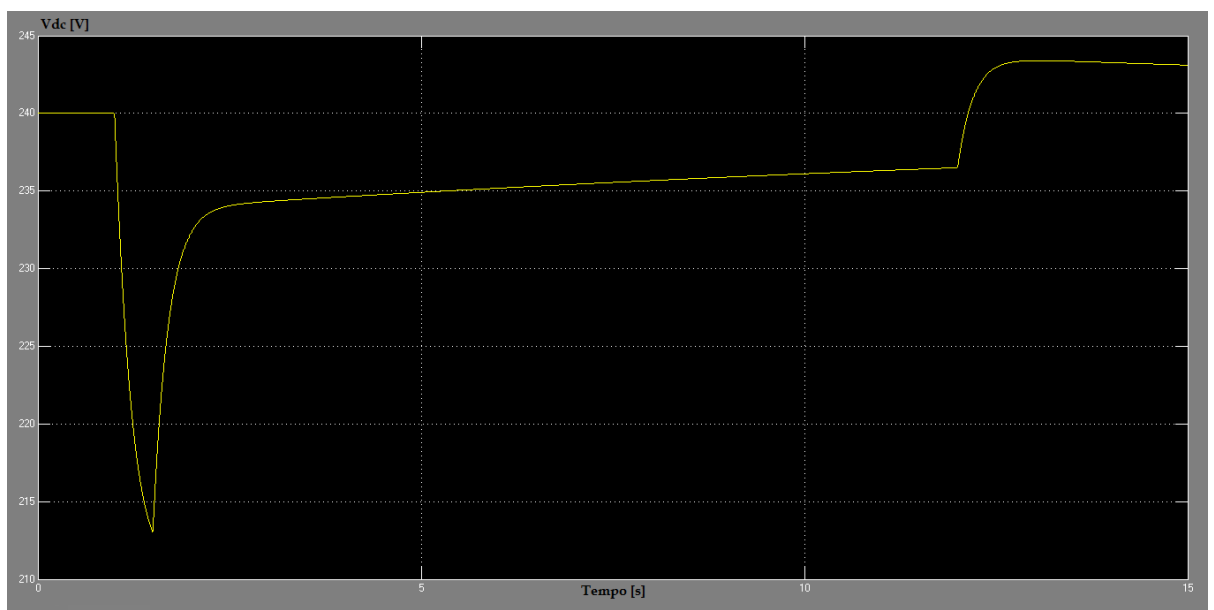


Figura 4.8: tensione lato accumulatore

Un'altra considerazione importante è che avendo la rete troppo veloce oltre a non sfruttare la velocità dell'accumulo non ne sfrutto nemmeno la capacità.

Come si vede in figura 4.8 infatti la tensione sull'accumulo rimane sempre superiore ai 210V anche se potrebbe arrivare ai 150V.

Come risultato ho sfruttato solo 30V dei 90V disponibili.

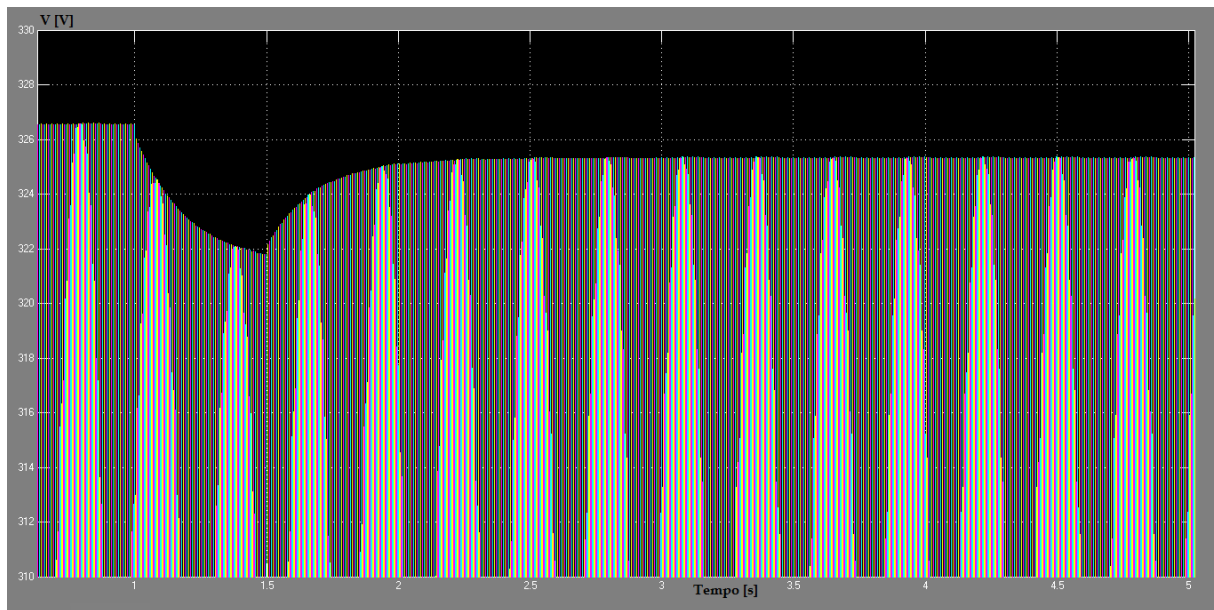


Figura 4.9: tensioni lato rete

L'ultima considerazione di questo caso è sulla tensione della rete: come si vede in figura 4.9 c'è una caduta dovuta all'elevata corrente trasferita durante l'attacco di carico che in caso di miglior rapporto tra velocità della rete e dell'accumulo può essere sensibilmente ridotta.

SIMULAZIONE 1, CASO 3: REGOLATORI OTTIMALI

In questo terzo caso i regolatori PI sono dimensionati in maniera ottimale.

Regolatore della rete (banda passante 0,9Hz):

$K_p=0$

$K_i=0,75$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz):

$K_p=14$

$K_i=150$

Rispetto ai casi precedenti la differenza di velocità dei due regolatori è ancora più accentuata: in questo modo l'accumulo è abbastanza veloce da mantenere la tensione del carico a livelli accettabili e compensa la potenza del picco iniziale molto più in fretta.

In questo caso la simulazione è svolta per un tempo più lungo in modo da permettere alle varie grandezze di andare a regime.

Per evidenziare meglio gli istanti significativi della simulazione nei grafici è omessa la parte centrale dove la rete ricarica l'accumulo e raggiunge lentamente il regime.

La simulazione dura un minuto, tempo scelto come minimo tra un attacco di carico e il successivo: di questo minuto si visualizzano i primi 10 e gli ultimi 5 secondi (che saranno separati con una linea bianca verticale).

Visto il prolungamento della simulazione, il distacco di carico avviene all'istante $t=56s$ invece che all'istante $t=12s$.

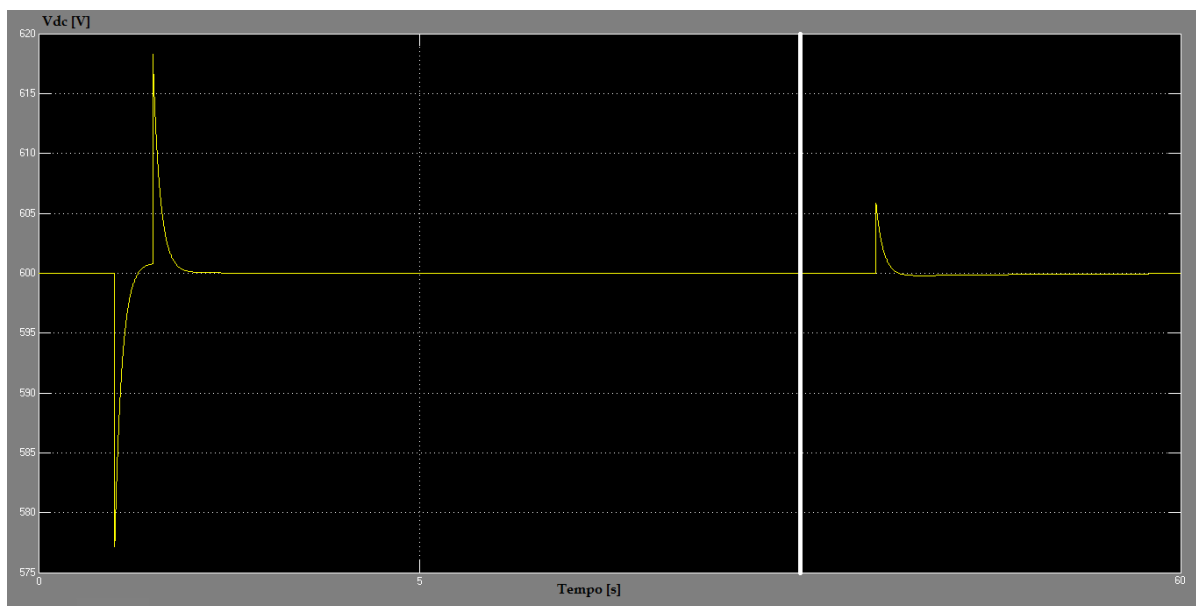


Figura 4.10: tensione lato carico

I tre picchi in figura 4.10 corrispondono nell'ordine all'attacco di carico, alla diminuzione di corrente fino al suo valore nominale e al distacco di carico, naturalmente la loro ampiezza è proporzionale alla variazione di potenza.

Guardando la tensione del carico si vede già come con i regolatori così tarati essa viene contenuta entro il $\pm 4\%$ del valore nominale.

I transistori si esauriscono in tempi dell'ordine dei decimi di secondo.

Si può concludere, considerando anche i due casi precedenti, che la tensione sul carico è praticamente indipendente dal regolatore della rete.

Un regolatore dell'accumulo opportunamente tarato è in grado da solo di contenere la tensione entro i livelli desiderati.

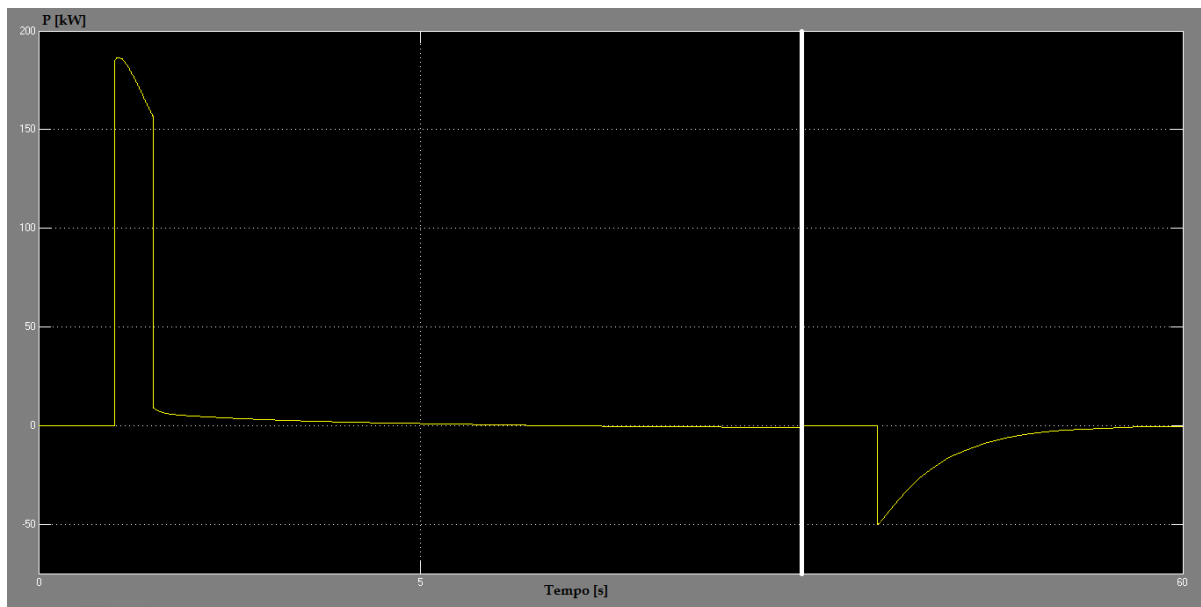


Figura 4.11: potenza erogata dall'accumulo

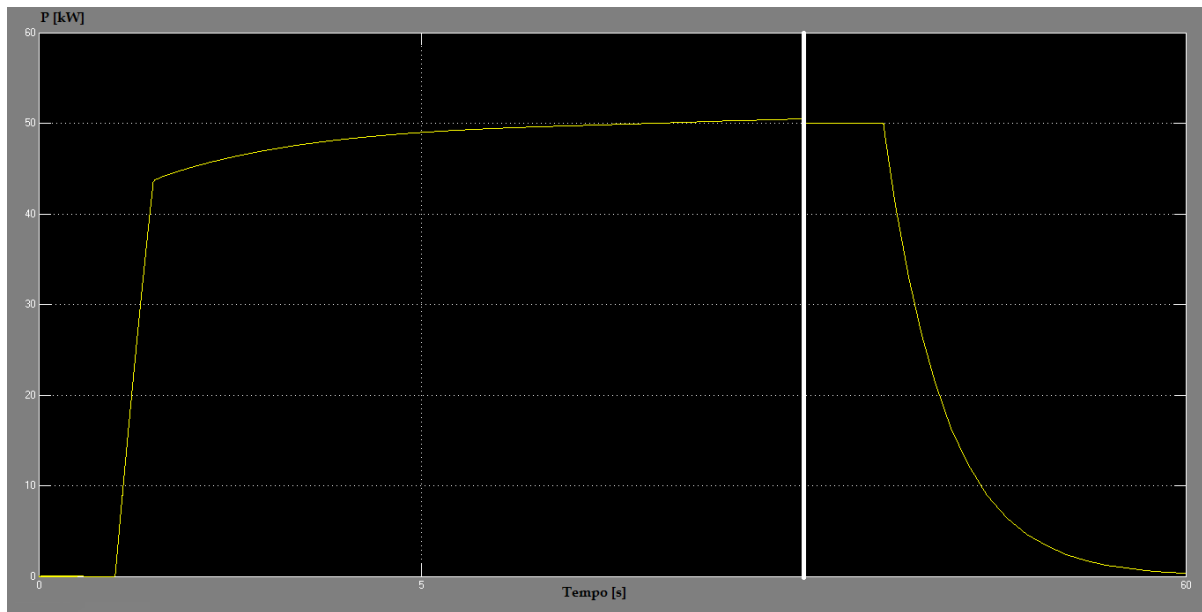


Figura 4.12: potenza erogata dalla rete

Si esamina adesso come viene divisa la potenza che viene assorbita dal carico: a tal fine nelle figure 4.11 e 4.12 si vede la parte di potenza fornita dall'accumulo e quella fornita dalla rete mentre la potenza assorbita dal carico è in figura 4.2 (con la differenza che in questo caso il distacco di carico avviene dopo 56s dall'inizio della simulazione invece che dopo 12s).

Guardando gli andamenti delle potenze risulta che tutto il gradino di potenza iniziale è compensato dall'accumulo mentre la potenza della rete sale velocemente ma senza salti.

La potenza del picco iniziale è fornita quasi interamente dall'accumulo e la rete non supera mai il suo valore nominale.

Al termine del mezzo secondo iniziale, dove la potenza richiesta è quadrupla, si passa alla potenza nominale e anche in questo caso tutto il salto è coperto dall'accumulo.

La potenza della rete continua a crescere rallentando fino ad arrivare a un valore di circa il 10% superiore a quello nominale per poi decrescere nuovamente e assestarsi a 50kW, questo eccesso rispetto alla nominale è la potenza che viene trasferita all'accumulo per ricaricarlo (questo andamento avviene in tempi lunghi e nei grafici riportati si vede solo il suo inizio e il suo regime).

La potenza dell'accumulo dopo il salto decresce lentamente e dopo circa 5 secondi dalla fine del picco iniziale di potenza cambia di segno.

L'istante del cambio di segno è lo stesso istante in cui la potenza della rete passa per il valore 50kW.

A regime l'accumulo si è completamente ricaricato e la sua potenza trasferita è tornata a zero.

A regime quindi l'accumulo non trasferisce più potenza e la rete alimenta il carico da sola.

Nell'istante del distacco di carico la potenza della rete decresce fino ad arrivare a zero: anche in questo caso il distacco non è istantaneo sulla rete e il gradino è compensato dall'accumulo che assorbe tutta la potenza che la rete fornisce dopo il distacco di carico.

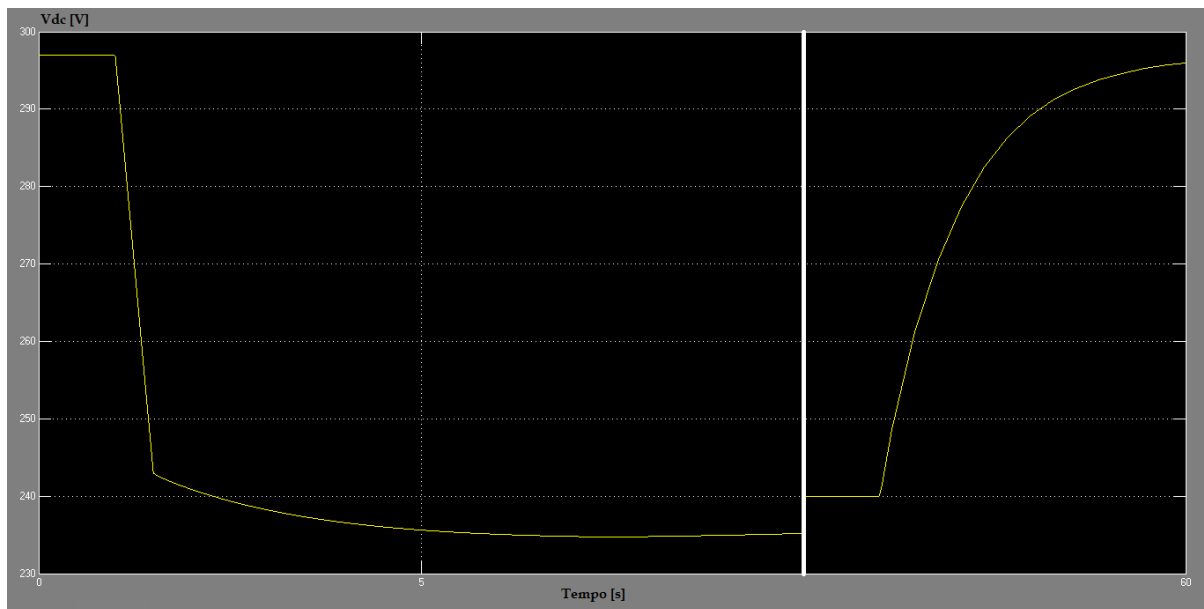


Figura 4.13: tensione lato accumulo

Un'altra grandezza interessante è la tensione sull'accumulo, in questo caso l'accumulo è precaricato a 297V invece che a 240V: il motivo è che il distacco di carico porta la tensione finale sull'accumulo a questo valore e in caso di un nuovo attacco di carico il valore iniziale di tensione sull'accumulo sarebbe il medesimo.

Il fatto che durante un ciclo di lavoro (ipotizzato minimo di un minuto) la tensione sull'accumulo non sfora i limiti dimostra che il valore di capacità scelto è corretto.

Nell'istante dell'attacco di carico la tensione scende molto rapidamente visto che la potenza richiesta è estremamente elevata.

Finita l'elevata richiesta iniziale la tensione scende più lentamente e nell'istante in cui la potenza dell'accumulo cambia segno la tensione sull'accumulo comincia a risalire.

La risalita della tensione dura fino a che si ristabilisce il valore base di 240V.

All'istante del distacco di carico la tensione dell'accumulo sale ulteriormente portandosi ad un valore superiore ai 240V (cioè ai 297V prima menzionati), ciò è necessario per estinguere il transitorio di distacco di carico, tale energia non è comunque sprecata e viene mantenuta per il successivo attacco di carico.

La tensione di regime dell'accumulo quando il carico è inserito sarà quindi di 240V mentre quando il carico non è inserito sarà di 297V.

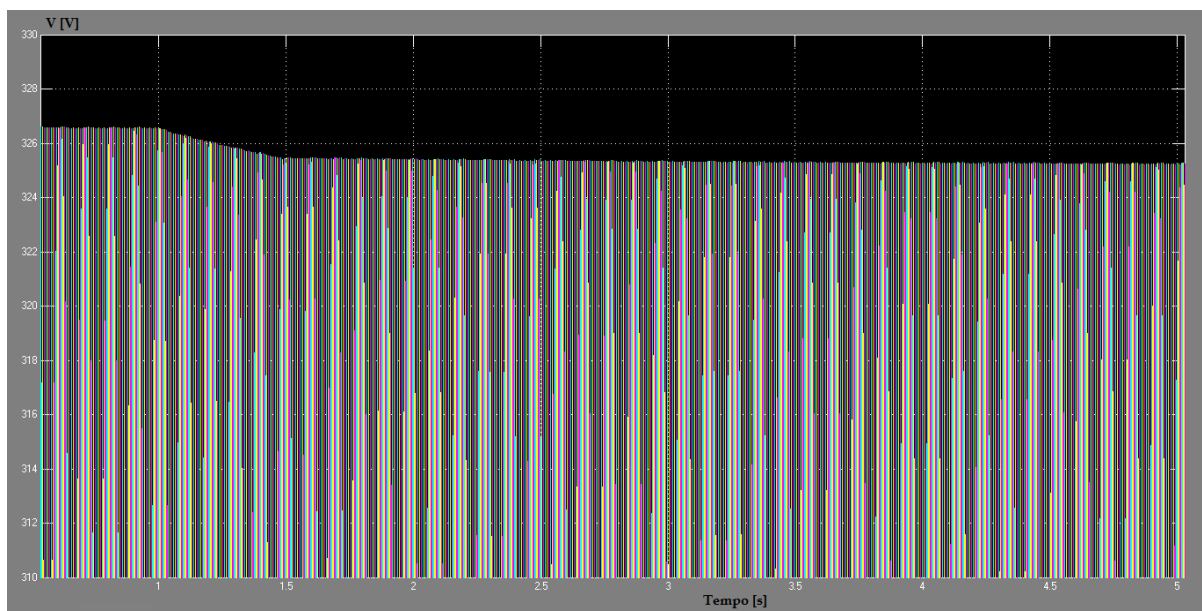


Figura 4.14: tensioni lato rete

Un ulteriore miglioramento si vede sulla tensione della rete, la diminuzione infatti è inferiore e meno brusca grazie alla presenza di un sistema di accumulo che agisce molto più velocemente della rete.

In questo grafico, contrariamente agli altri, si è scelto di visualizzare solo i primi 5 secondi che permettono un miglior confronto con il caso precedente (figura 4.9).

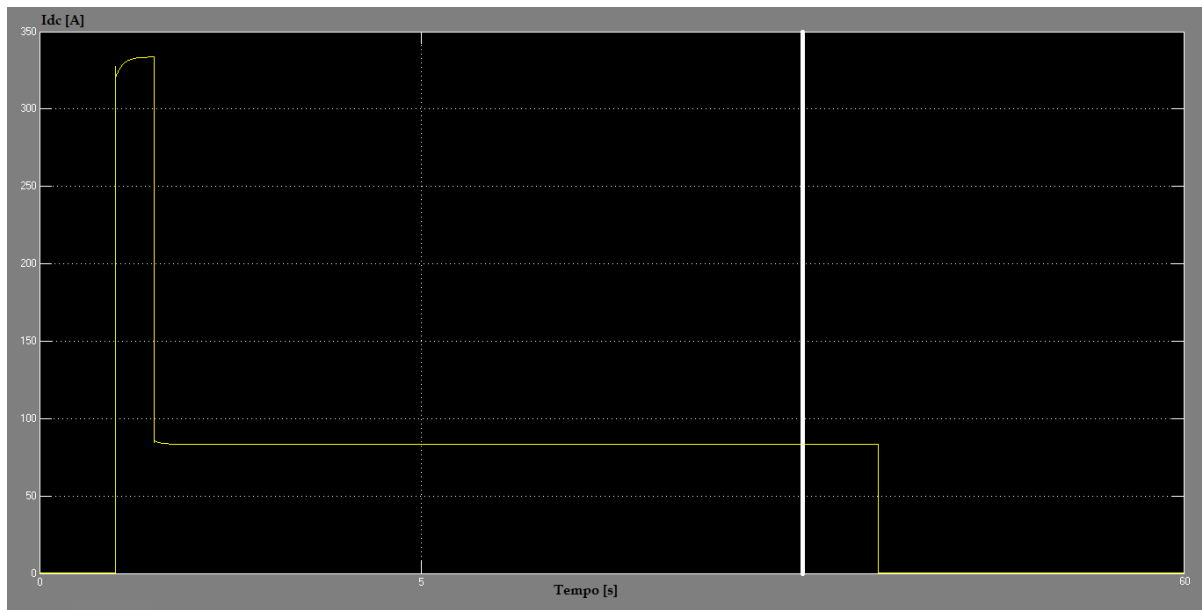


Figura 4.15: corrente del carico

Anche l'andamento della corrente del carico migliora confrontando la figura 4.15 con la figura 4.5, sia per il fatto che i transitori di tensione sono molto più contenuti sia per il fatto che la corrente riesce a salire molto più velocemente.

SIMULAZIONE 1, CASO 4: CAPACITA' NON SUFFICIENTE

In questo ultimo caso della prima simulazione si vuole vedere cosa succede se la capacità dell'accumulo non è sufficiente a coprire tutta la potenza richiesta inizialmente dal carico nella fascia di tensione accettabile.

In particolare si utilizzano gli stessi regolatori ottimali del caso precedente e si riduce la capacità dell'accumulo a 5F.

Come si vedrà dai grafici interverrà il limitatore di tensione minima.

Bisogna prestare particolare attenzione agli istanti di inserzione e di disinserzione del limitatore che sono: il primo appena prima dell'istante $t=1,5s$ e il secondo appena prima dell'istante $t=2,8s$.

Poiché a lungo termine la simulazione è uguale alla precedente e per una maggior chiarezza nei grafici seguenti si visualizzeranno solo i primi 5 secondi.

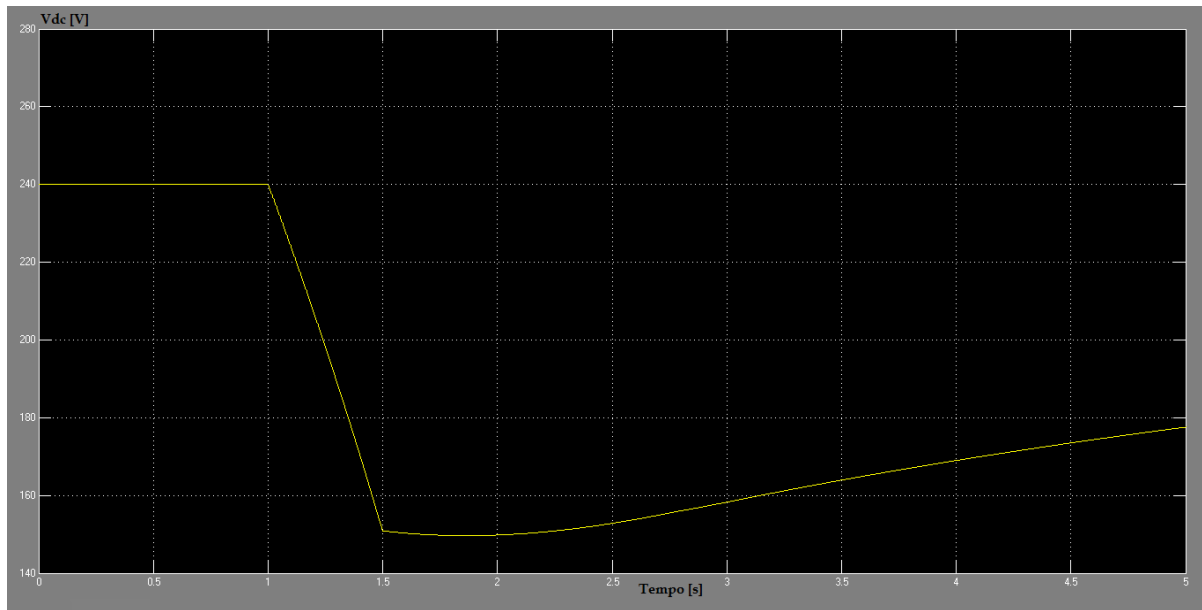


Figura 4.16: tensione lato accumulatore

La prima grandezza da considerare è ovviamente la tensione dell'accumulo, osservando l'andamento si vede che essa non scende mai molto al di sotto del valore limite 150V, nel suo punto più basso il valore di tensione è di 149,6V.

Come accennato nel capitolo 2 di questa tesi questo limitatore non è netto ed è per questo che la tensione riesce, seppur di poco, a scendere sotto i 150V.

Una descrizione più dettagliata del limitatore è fornita in appendice.

Confrontando questa tensione con quella del caso precedente in figura 4.13 si vede che la tensione risale in maniera molto più rapida dopo l'istante $t=1,5s$.

Un'altra cosa che si nota è che la tensione dell'accumulo non subisce brusche variazioni durante l'inserzione e la disinserzione del limitatore, cosa che invece succede ad altre grandezze.

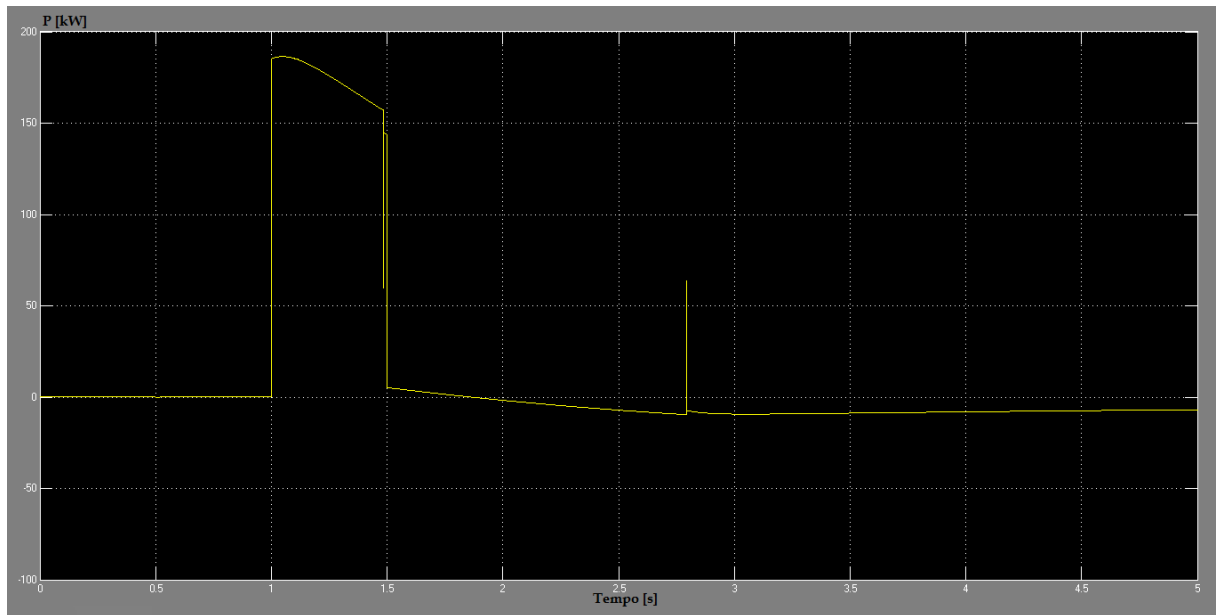


Figura 4.17: potenza erogata dall'accumulo

Per quanto riguarda la potenza erogata dall'accumulo invece gli istanti di inserzione e disinserzione del limitatore sono chiaramente visibili e caratterizzati da piccoli transitori.

Il transitorio di inserzione è molto rapido e porta una leggera diminuzione della potenza fornita dall'accumulo, inoltre la potenza diminuisce molto più rapidamente del caso precedente fino all'istante di disinserzione del limitatore.

Il transitorio di disinserzione è anche esso molto rapido e al contrario del primo non porta significative variazioni di potenza al suo termine.

Dopo questo secondo transitorio la potenza dell'accumulo riprende il suo normale andamento di ricarica.

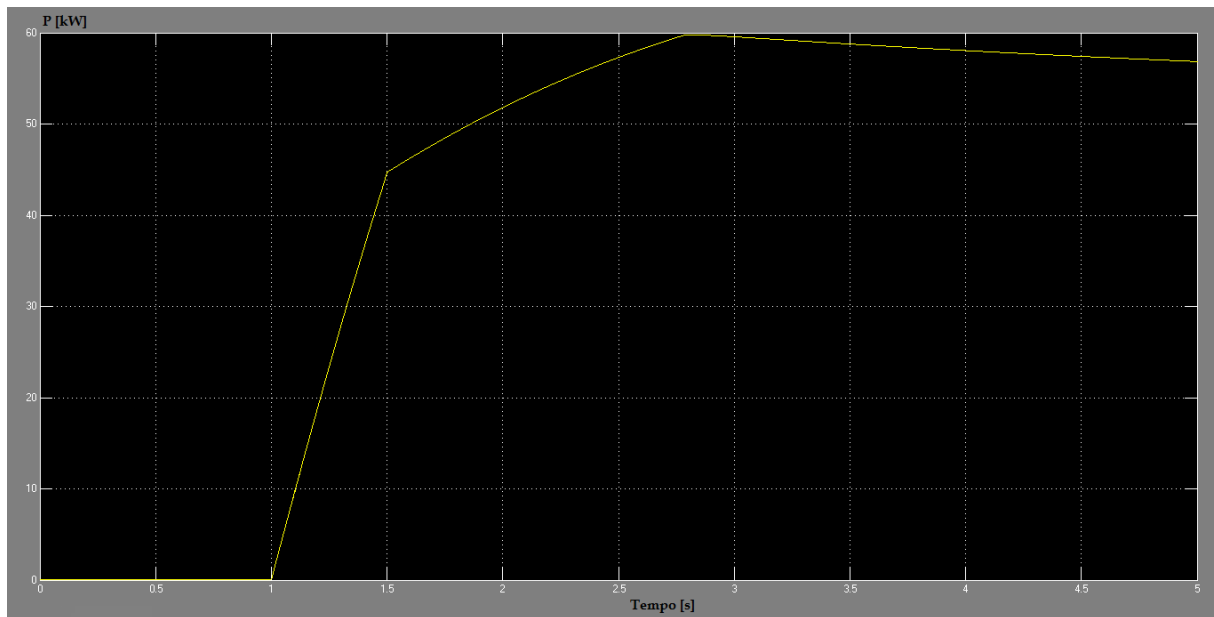


Figura 4.18: potenza erogata dalla rete

Anche per quanto riguarda la potenza erogata dalla rete si nota una certa differenza rispetto al caso precedente in figura 4.12.

Nonostante non ci siano transitori evidenti come quelli nella potenza dell'accumulo le variazioni sono notevoli.

Durante l'inserzione del limitatore la differenza è poco visibile visto che subito dopo finisce la richiesta della potenza iniziale, tuttavia c'è un prelievo di potenza dalla rete molto più rapido del caso precedente.

Quando il limitatore viene disinserito la potenza richiesta alla rete comincia a scendere formando un punto angoloso nell'andamento all'istante di disinserzione.

Il punto di disinserzione è, in questo caso, il punto a potenza più elevata, la potenza infatti raggiunge quasi il valore di 60kW, un valore che in condizioni non di emergenza non potrebbe mai raggiungere.

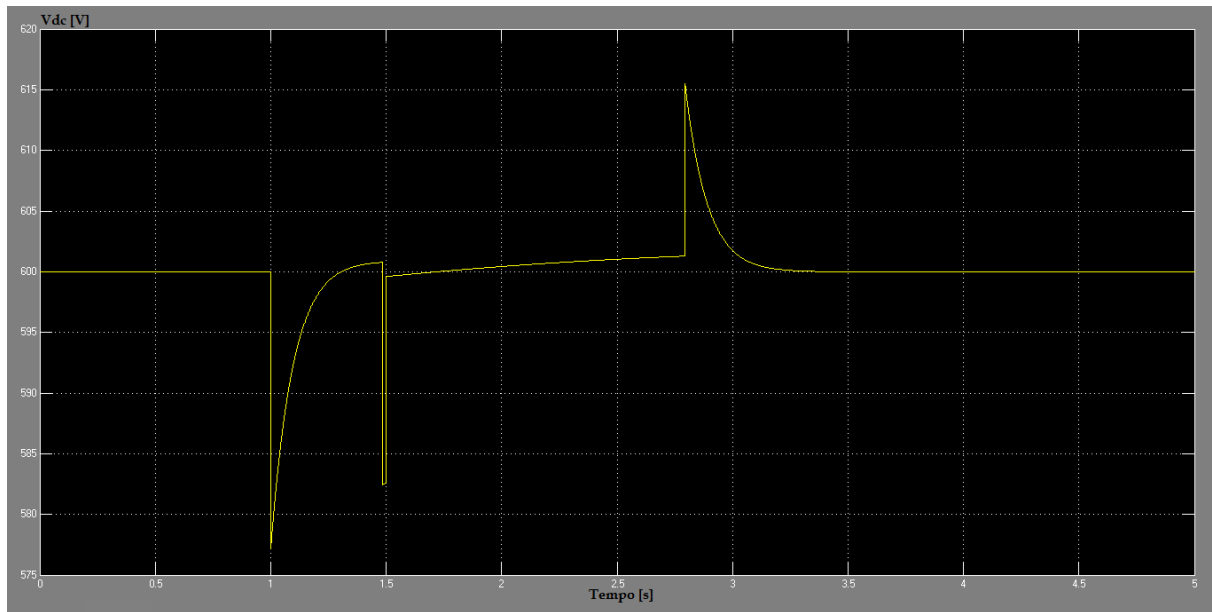


Figura 4.19: tensione lato carico

La tensione lato carico risulta molto più perturbata rispetto al caso precedente, ci sono infatti ben 4 transitori invece che 2 nei primi 5 secondi.

Il primo transitorio è lo stesso del caso precedente, il secondo e il terzo sono in rapida successione e rappresentano rispettivamente l'inserzione del limitatore e il termine dell'elevata potenza iniziale.

L'ultimo transitorio rappresenta la disinserzione del limitatore.

Se si osserva la tensione tra il secondo e il quarto transitorio si vede come essa non tende a tornare al valore standard di 600V, anche se non si scosta eccessivamente, questo perché ci troviamo in condizioni di emergenza.

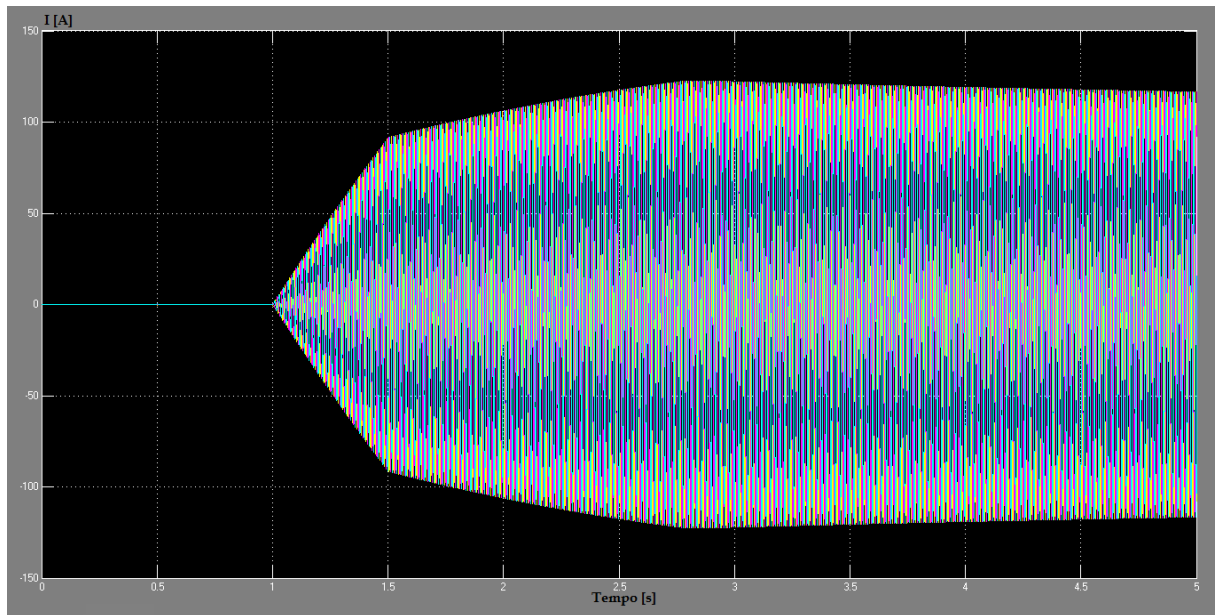


Figura 4.20: correnti lato rete

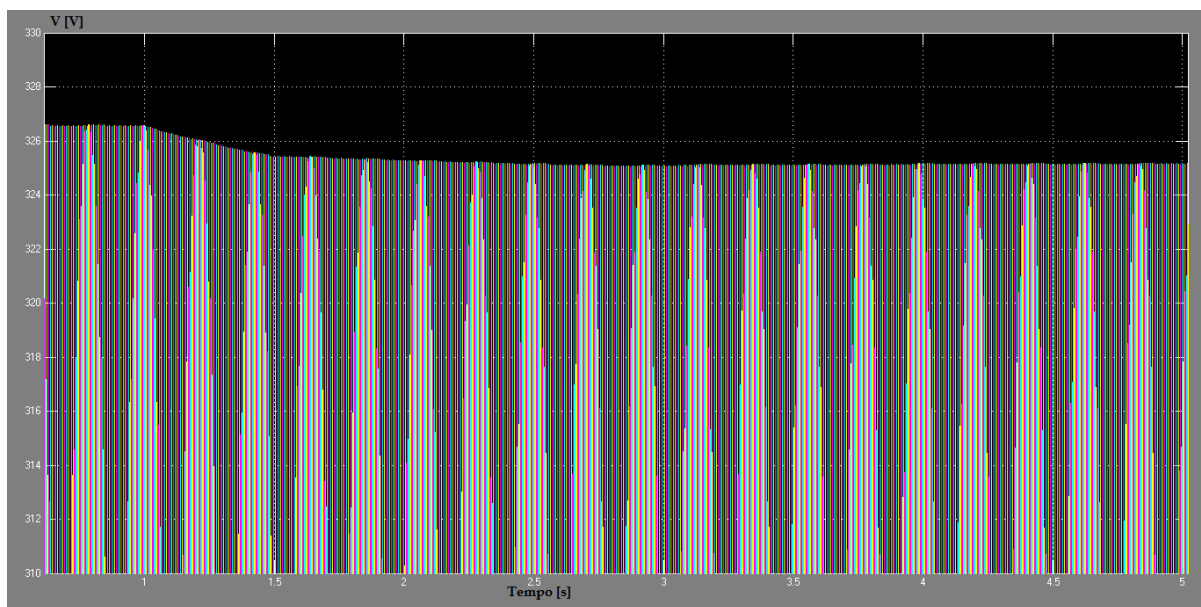


Figura 4.21: tensioni lato rete

Osservando le tensioni e le correnti della rete si vede come, nonostante la condizione di emergenza, non ci sono particolari perturbazioni tranne che per la corrente richiesta un po' più elevata.

CAPITOLO 5:

Simulazione 2: carico con frenatura a recupero

La seconda simulazione tratta un carico da 50kW che inizialmente assorbe questa potenza per un certo periodo di tempo e successivamente frena per un periodo di tempo uguale e un valore di potenza recuperata in frenatura di 30kW.

Questo andamento di potenza è tipico degli azionamenti elettrici.

Un carico con questo andamento di potenza privo di accumulo sprecherebbe tutta l'energia che si può invece recuperare in frenatura.

Il modello in Simulink del carico è riportato di seguito.

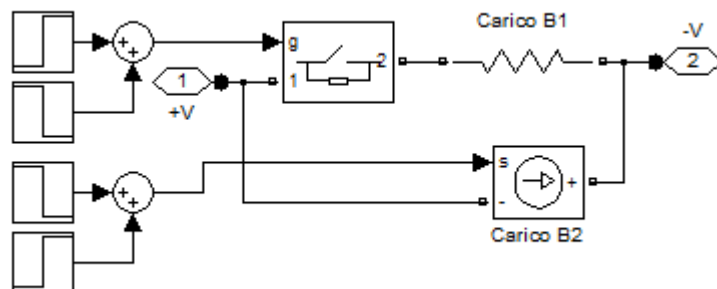


Figura 5.1: carico B

Anche in questo caso il modello del carico è piuttosto semplice e simile al precedente.

I due blocchetti esagonali +V e -V sono i collegamenti esterni rispettivamente positivo e negativo del carico sulla rete in continua.

Per simulare la variazione di potenza si utilizzano una resistenza e un generatore di corrente pilotato posti in parallelo tra loro attivati in successione.

La logica della variazione di carico è la stessa della simulazione precedente, questa volta però quando il carico frena, non potendo definire una resistenza negativa, si utilizza un generatore di corrente.

Il carico risulta quindi a resistenza costante durante l'assorbimento e a corrente costante durante la frenatura.

All'istante $t=0$ entrambi gli interruttori sono aperti e la corrente è nulla.

All'istante $t=1s$ l'interruttore della resistenza "Carico B1" si chiude, tale carico è il carico nominale che assorbe 50kW.

All'istante $t=4,5s$ l'interruttore della resistenza si riapre e nello stesso tempo si attiva la pilotante del generatore "Carico B2".

Tale generatore pilotato è di corrente continua e viene utilizzato per simulare una generazione di corrente ossia una frenatura: tale corrente è di 50A che moltiplicata per i 600V della continua fa risultare una potenza di 30kW.

Infine, all'istante $t=8s$, il generatore "Carico B2" si spegne simulando il distacco di carico.

Per il controllo dell'interruttore della resistenza si utilizzano dei blocchi gradino, proprio come nella simulazione precedente.

Sapendo che il valore 1 sta per "interruttore chiuso" e il valore 0 sta per "interruttore aperto" sommando i due blocchi gradino si ottiene l'attacco e il distacco di carico.

Il controllo del generatore pilotato di corrente avviene nello stesso modo, tranne per il fatto che l'ampiezza, invece di andare da 0 a 1, va da 0 al valore della corrente, cioè 50.

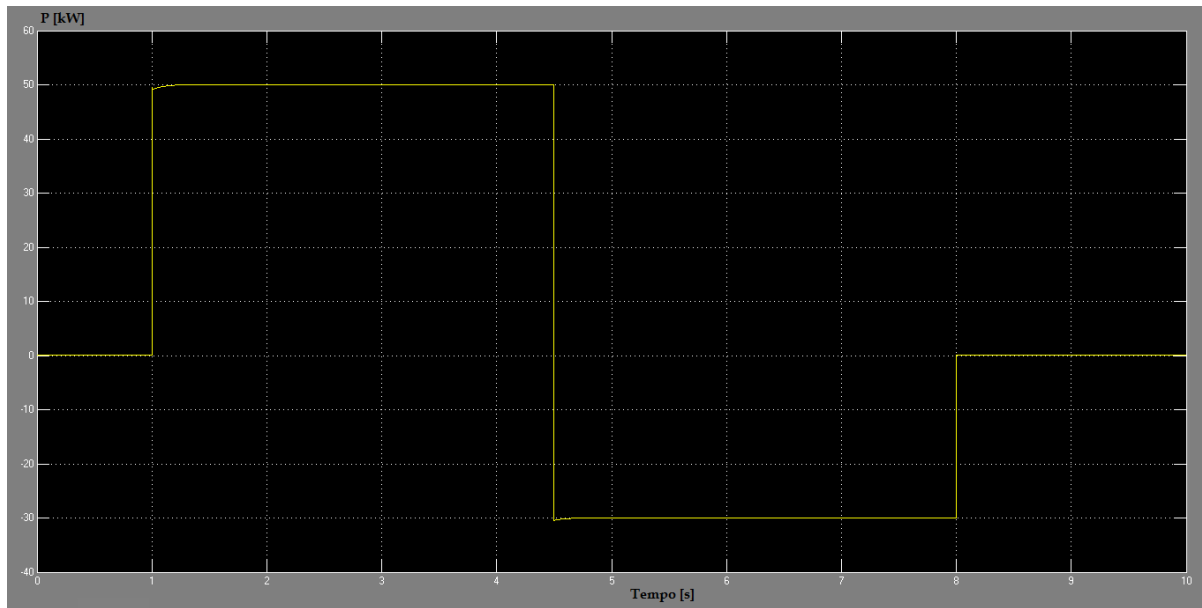


Figura 5.2: andamento della potenza assorbita dal carico B

In figura 5.2 si vede l'andamento della potenza assorbita dal carico B.

La durata della simulazione è stata scelta di 10s.

Bisogna ora dimensionare la capacità dell'accumulo: essendo il ciclo di lavoro abbastanza breve una scelta logica potrebbe essere quella di un valore in grado di assorbire interamente l'energia di frenatura.

Ovviamente ciò significa che il ciclo di lavoro considerato in figura 5.2 deve essere quello a potenza più elevata e di maggior durata che il carico può effettuare.

L'energia della frenatura si può calcolare in maniera semplice moltiplicando la potenza di 30kW per la sua durata di 3,5s da cui risulta un'energia recuperabile di 105kJ.

La ΔV ammissibile sull'accumulo è da 240V a 300V quindi posso calcolare il valore della capacità:

$$C = 2 * W_{frenatura} / \Delta V^2 = 2 * 105k / (300^2 - 240^2) = 6,482F$$

Che per sicurezza e per avere un valore standard arrotondo a 7F.

Anche in questo caso il valore di capacità ottenuto è compatibile con l'impiego dei supercondensatori.

In realtà l'accumulo parte da una tensione inferiore a 240V all'inizio della frenatura poiché ha già ceduto parte della sua energia immagazzinata quando il carico stava assorbendo.

Scegliendo una capacità di 7F permettiamo al ciclo di lavoro di essere anche discontinuo, cioè ipotizziamo che la frenatura non sia per forza immediata dopo la fine dell'assorbimento ma possa avvenire anche dopo un certo tempo, quando l'accumulo si è già ricaricato per opera della rete.

SIMULAZIONE 2, CASO 1: REGOLATORI UGUALI A QUELLI DELLA SIMULAZIONE 1

In questo primo caso i regolatori della rete e dell'accumulo sono gli stessi utilizzati per il carico A nella simulazione precedente e hanno quindi gli stessi coefficienti K_p e K_i .

Anche la logica di controllo adottata è la stessa.

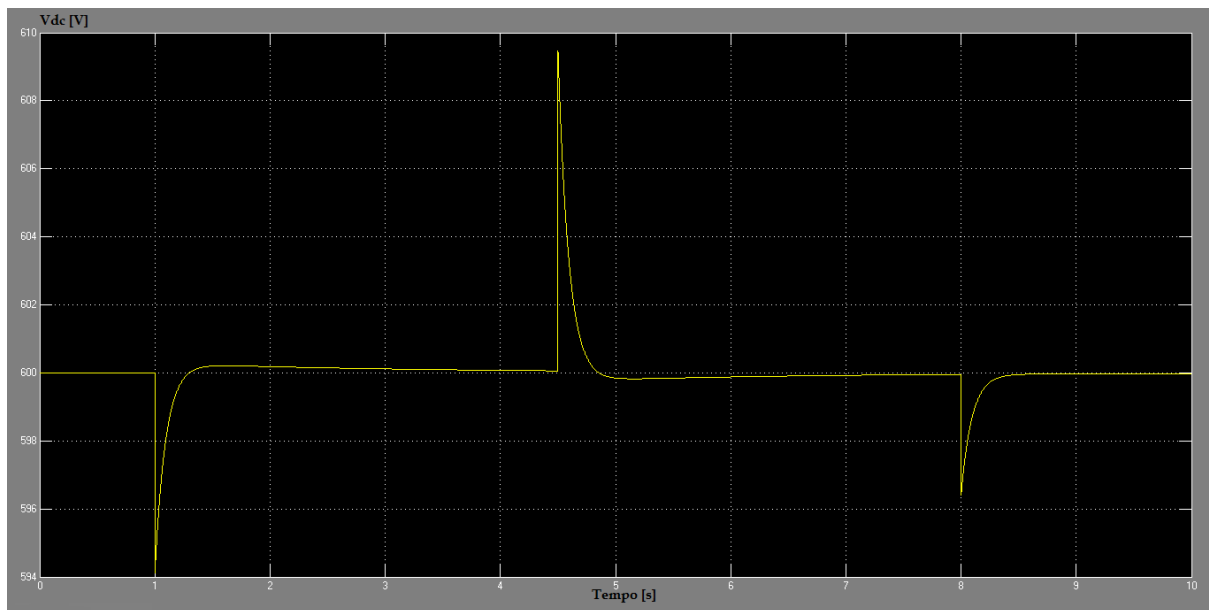


Figura 5.3: tensione lato carico

La prima grandezza che si osserva è la tensione sul carico, questa volta la massima caduta di tensione è inferiore al 2%, ciò era prevedibile visto che questo carico ha i salti di potenza inferiori al precedente.

Dal punto di vista della tensione sul carico questo sistema e questa velocità di regolazione sono quindi efficaci.

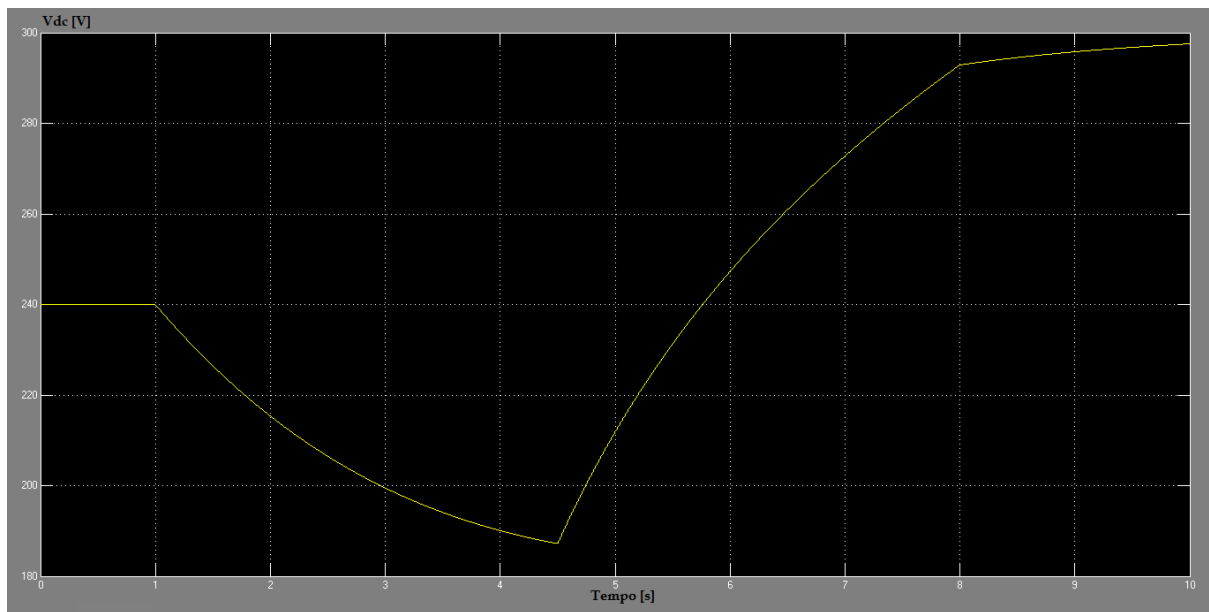


Figura 5.4: tensione lato accumulatore

La seconda grandezza osservata è la tensione lato accumulatore, come previsto la capacità utilizzata è sufficiente a mantenere la tensione al di sotto del valore massimo di 300V anche se non di molto.

La tensione decresce fino all'istante $t=4,5s$ dove inizia la frenatura e cresce rapidamente per tutto il suo periodo, la crescita della tensione si riduce di molto dopo la fine della frenatura visto che c'è solo la potenza residua data dalla rete ad incrementarla.

Dal punto di vista della tensione sull'accumulo compaiono invece i primi inconvenienti.

La tensione finale sull'accumulo risulta infatti troppo alta: se dovesse esserci un altro ciclo di lavoro uguale in successione, l'accumulo supererebbe sicuramente il valore limite di 300V, con conseguente intervento del limitatore di massima tensione e conseguente spreco di energia.

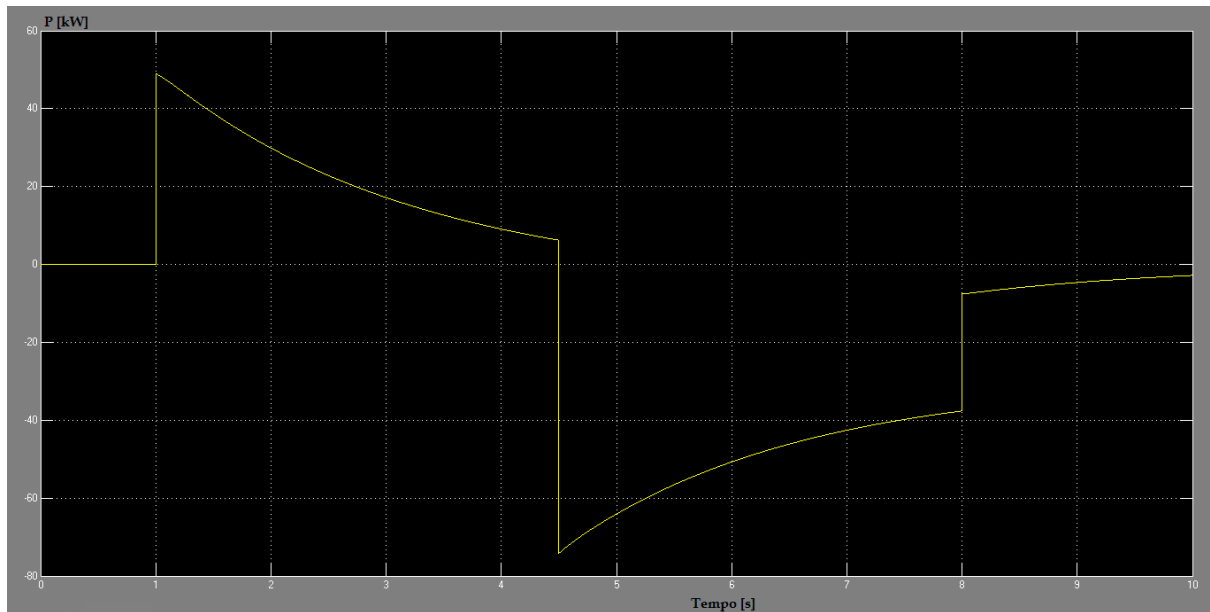


Figura 5.5: potenza erogata dall'accumulo

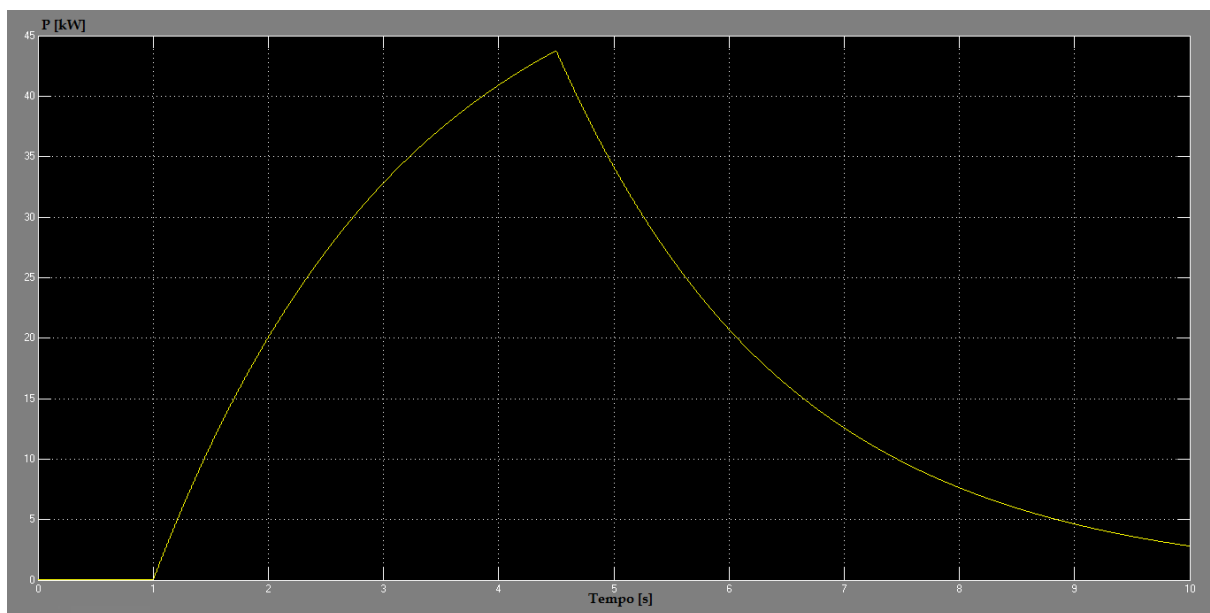


Figura 5.6: potenza erogata dalla rete

La potenza della rete sale molto lentamente senza neppure raggiungere il valore di regime di 50kW ma fermandosi a circa 43kW, all'inizio della frenatura decresce poi sempre in maniera lenta fino ad azzerarsi.

Il fatto che la potenza della rete non raggiunga il valore di 50kW è certamente una cosa positiva visto che comporta costi inferiori.

Il profilo di potenza che risulta è tuttavia pessimo e potrebbe essere reso certamente migliore utilizzando un altro tipo di logica di controllo.

Sempre per quanto riguarda la potenza della rete bisogna sottolineare che il regolatore è tarato per non “vedere” la frenatura e tratta il carico semplicemente come se si spegnesse.

Da questo punto di vista la logica è corretta avendo scelto che la rete non deve assorbire potenza.

L'accumulo invece, che come prima si assume la responsabilità di compensare i gradini, si ritrova in erogazione solo nel primo periodo mentre sia durante la frenatura sia dopo, quando il carico ha finito il suo ciclo, si ritrova ad assorbire più energia di quanta ne ha fornita.

SIMULAZIONE 2, CASO 2: CAPACITA' INSUFFICIENTE

In questo secondo caso, prima di esaminare delle migliori soluzioni per la gestione di questo tipo di carico, si vuole mostrare l'effetto dell'intervento del limitatore di massima tensione.

A tal fine si mantiene la logica di controllo come quella del caso precedente e si riduce la capacità dell'accumulo da 7F a 6F.

Per quanto riguarda i regolatori invece si mantiene uguale quello dell'accumulo e si rende più veloce quello della rete.

Il motivo di questo incremento di velocità è di permettere l'intervento del limitatore in tempi più brevi.

L'energia che l'accumulo si ritrova in eccesso alla fine del ciclo di lavoro è la stessa del caso precedente nonostante questa variazione di velocità.

Con un valore di capacità inferiore non sarà quindi in grado di recuperarla tutta.

Regolatore della rete (banda passante 12Hz):

$K_p=0$

$K_i=7,5$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz):

$K_p=14$

$K_i=150$

Come si vedrà dai grafici il limitatore di tensione massima interverrà solo per un breve periodo: bisogna prestare particolare attenzione agli istanti di inserzione e di disinserzione del limitatore che sono il primo a circa $t=7,6s$ e il secondo esattamente all'istante $t=8s$.

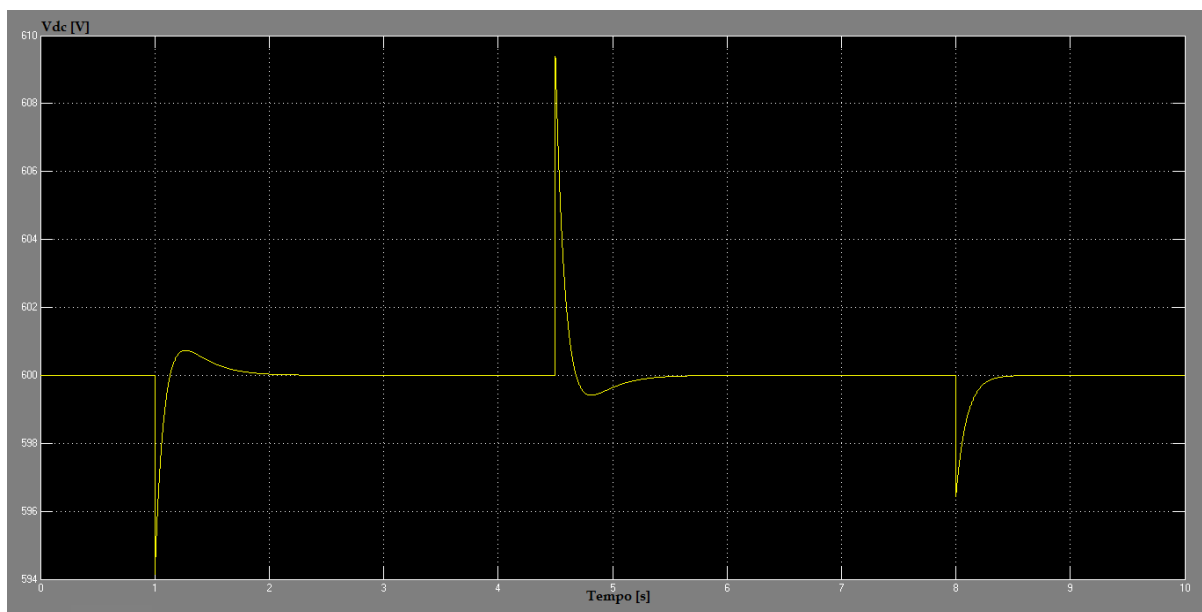


Figura 5.7: tensione lato carico

La tensione lato carico non subisce significative variazioni rispetto al caso precedente, ciò era prevedibile visto che il regolatore dell'accumulo non è stato modificato.

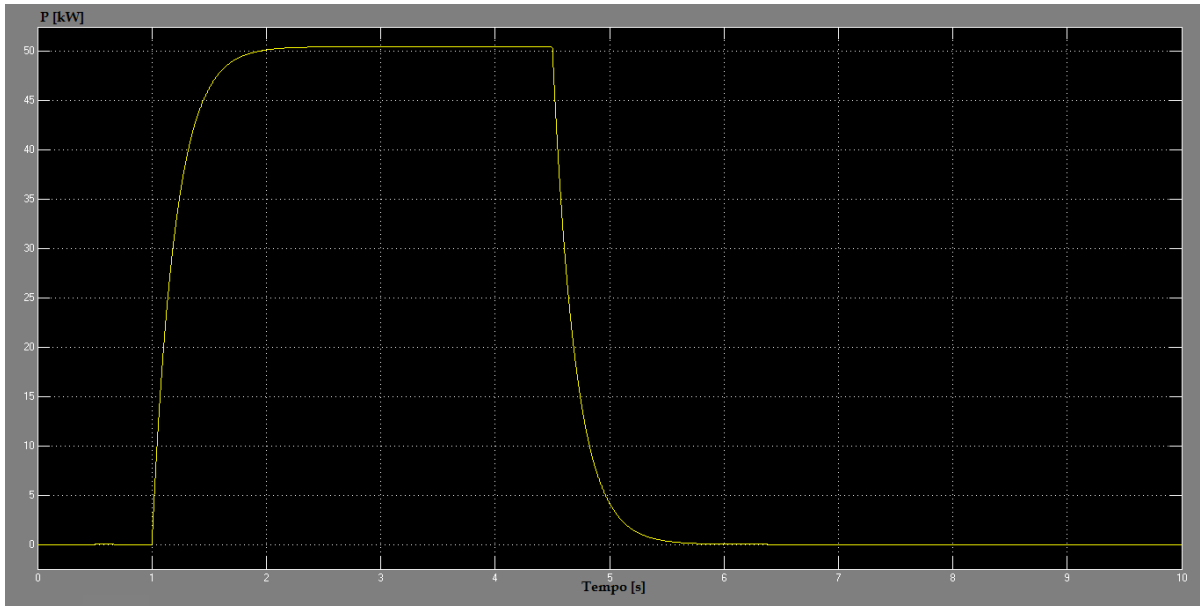


Figura 5.8: potenza erogata dalla rete

La potenza erogata dalla rete ora insegue molto più velocemente la potenza del carico e si azzerava più rapidamente all'istante di frenatura.

La maggiore velocità di regolazione qualitativamente non ha comunque portato alcun miglioramento effettivo.

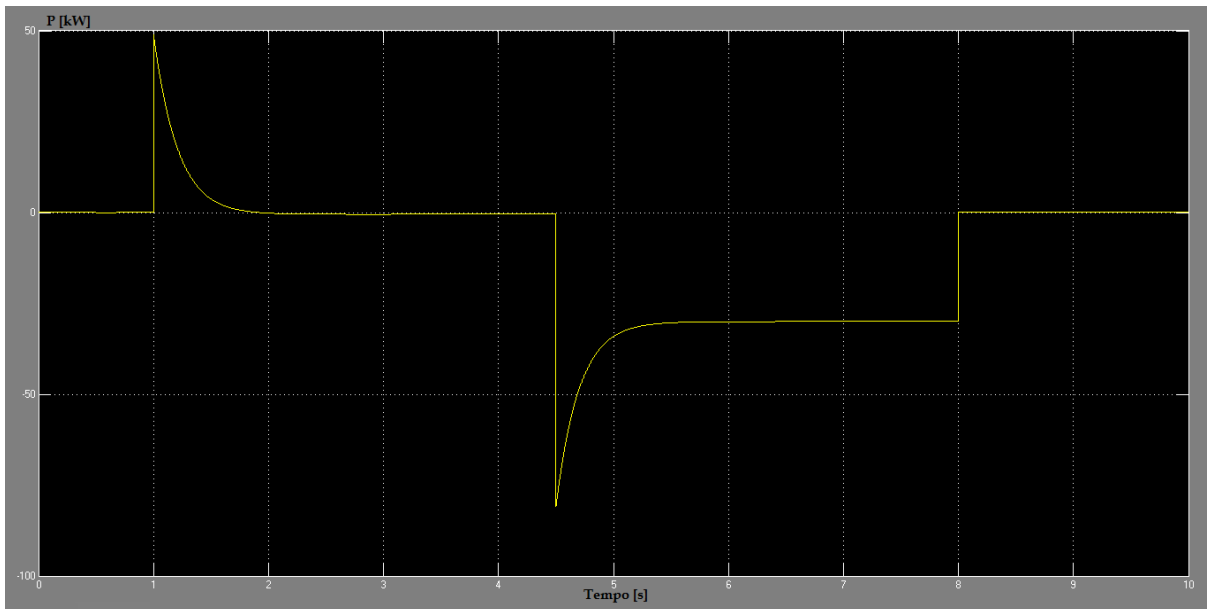


Figura 5.9: potenza erogata dall'accumulo

La potenza erogata dall'accumulo risulta adesso composta dai transistori dei due gradini di attacco di carico e di inizio frenatura più tutta l'energia recuperata dalla frenatura.

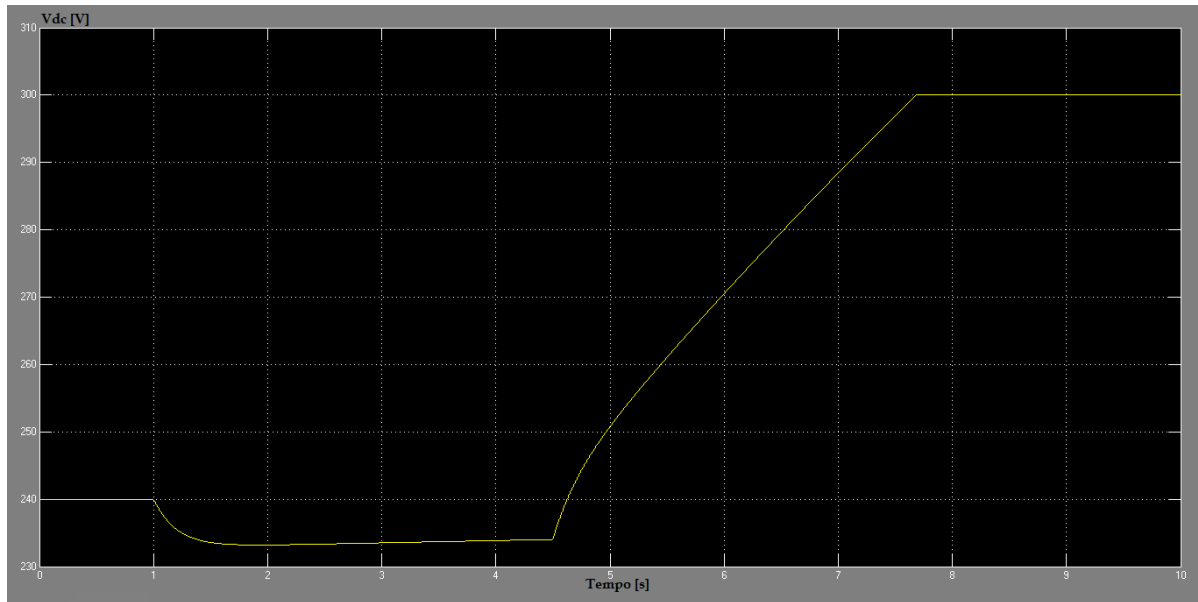


Figura 5.10: tensione lato accumulo

Rispetto al caso precedente dove la tensione non raggiungeva i 300V (vedi figura 5.4) questa volta la capacità non è sufficiente a contenere tutta l'energia restituita dalla frenatura.

Vicino all'istante $t=7,6s$ la tensione dell'accumulo raggiunge i 300V per poi rimanerci.

Rispetto al limitatore di tensione minima, come si è visto, questo limitatore non permette il superamento della soglia prestabilita

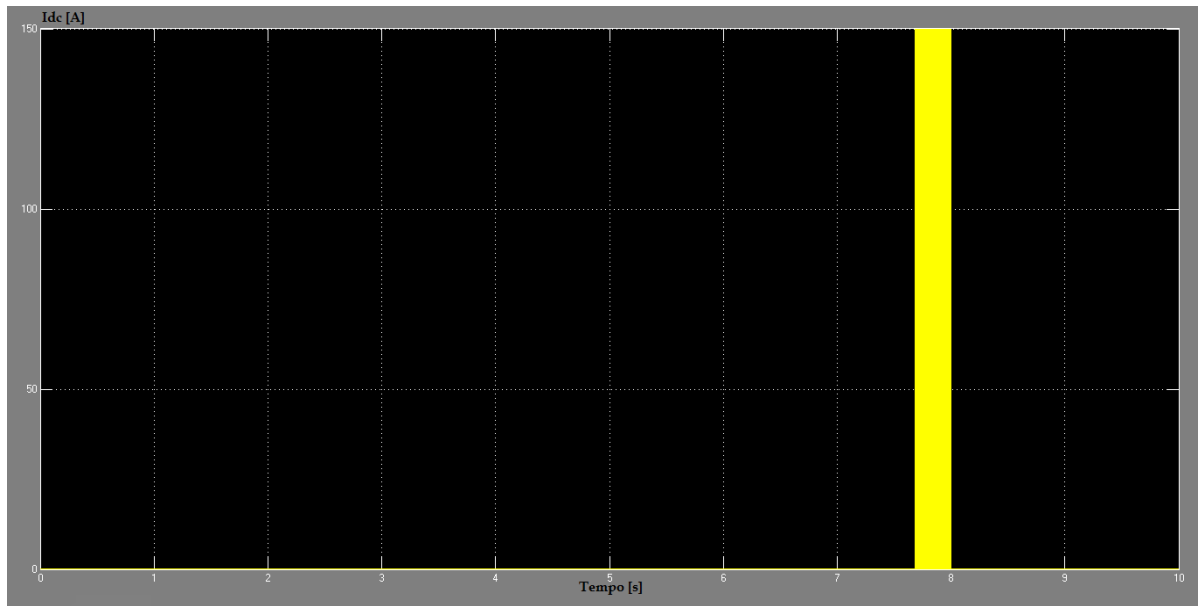


Figura 5.11: corrente dissipata dal limitatore di massima tensione

In figura 5.11 si può vedere l'effetto del limitatore di massima tensione: nell'istante in cui la tensione dell'accumulo raggiunge i 300V inizia la dissipazione di corrente che termina poi all'istante $t=8s$ quando la frenatura, e quindi l'energia inviata all'accumulo, è terminata.

Si nota anche che la corrente dissipata non ha un andamento a gradino ma è invece caratterizzata da un andamento rettangolare ad alta frequenza, questo perché la dissipazione provoca degli abbassamenti di tensione che fanno richiudere l'interruttore che poi si riapre poco dopo.

Un metodo per risolvere quest'inconveniente può essere quello di introdurre un'isteresi sul comparatore che regola l'apertura dell'interruttore.

Contrariamente al limitatore di tensione minima il limitatore di tensione massima non provoca alcuna perturbazione né sulla rete in continua a 600V né sulla rete in alternata.

Di negativo però, al contrario del primo, l'intervento di questo limitatore causa una dissipazione di energia.

SIMULAZIONE 2, CASO 3: LOGICA DI RIDUZIONE DELLA POTENZA PRELEVATA DALLA RETE

In questo terzo caso si esamina una nuova logica di controllo al fine di migliorare le prestazioni del sistema.

In particolare si vuole trarre il massimo vantaggio dalla riduzione della potenza richiesta alla rete.

La logica pensata è molto simile a quella utilizzata precedentemente: il regolatore dell'accumulo è identico, sia come logica che come velocità, il regolatore della rete invece cambia leggermente.

In particolare al regolatore della rete (si faccia riferimento alla figura 2.6 per lo schema della logica di controllo di tale regolatore) si toglie la parte relativa alla corrente del carico che ora vedrà sempre pari a zero.

Inoltre si incrementa significativamente il peso del contributo per la ricarica dell'accumulo e si limita la potenza richiedibile alla rete a 10kW.

Praticamente il regolatore della rete rimane con l'unica funzione di ricaricare l'accumulo.

La massima potenza che viene prelevata dalla rete sarà quindi di 6,75kW, che è inferiore al 15% della nominale del carico, come precedentemente accennato nel capitolo 2.

Dal tipo di logica scelta nasce però l'esigenza di aumentare la capacità dell'accumulo che deve ora riuscire a compensare anche tutto l'assorbimento di potenza del carico senza l'aiuto della rete.

La nuova capacità si può calcolare a partire dalla nuova energia richiesta:

$$W_{\text{ass}} = 50\text{kW} \cdot 3.5\text{s} = 175\text{kJ}$$

Da cui risulta:

$$C = 2 \cdot 175\text{kJ} / (240^2 - 150^2) = 9,972\text{F}$$

Che viene arrotondato a 10F.

Vista la scelta di questo tipo di logica la velocità del regolatore della rete è opportuno sia elevata in modo da ricaricare l'accumulo più velocemente.

Regolatore della rete (banda passante 23Hz):

$K_p=0$

$K_i=15$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz):

$K_p=14$

$K_i=150$

Come si vedrà dai grafici questo tipo di soluzione è molto migliore di quella adottata precedentemente nel caso 1.

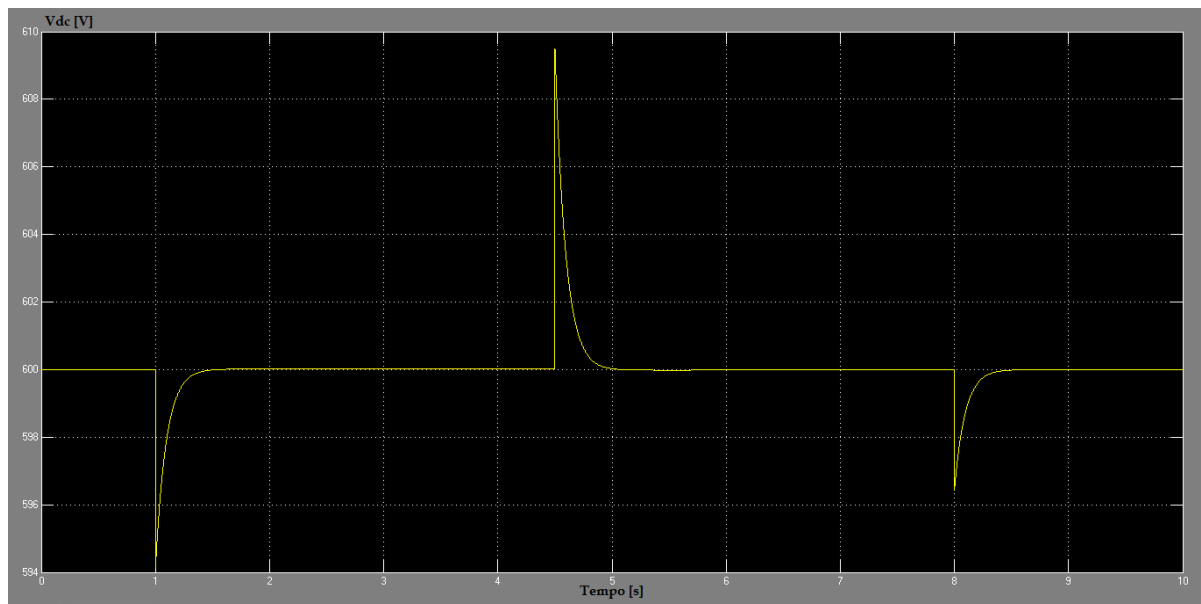


Figura 5.12: tensione lato carico

Come atteso la tensione sul carico è praticamente invariata rispetto al caso 1 e la sua variazione massima rispetto al valore nominale è inferiore al 2%.

I tre picchi osservati sono nell'ordine l'attacco di carico, il distacco e inizio di frenatura e la fine della frenatura.

Il picco centrale è ovviamente il più elevato visto che caratterizza l'istante dove il salto di potenza è maggiore.

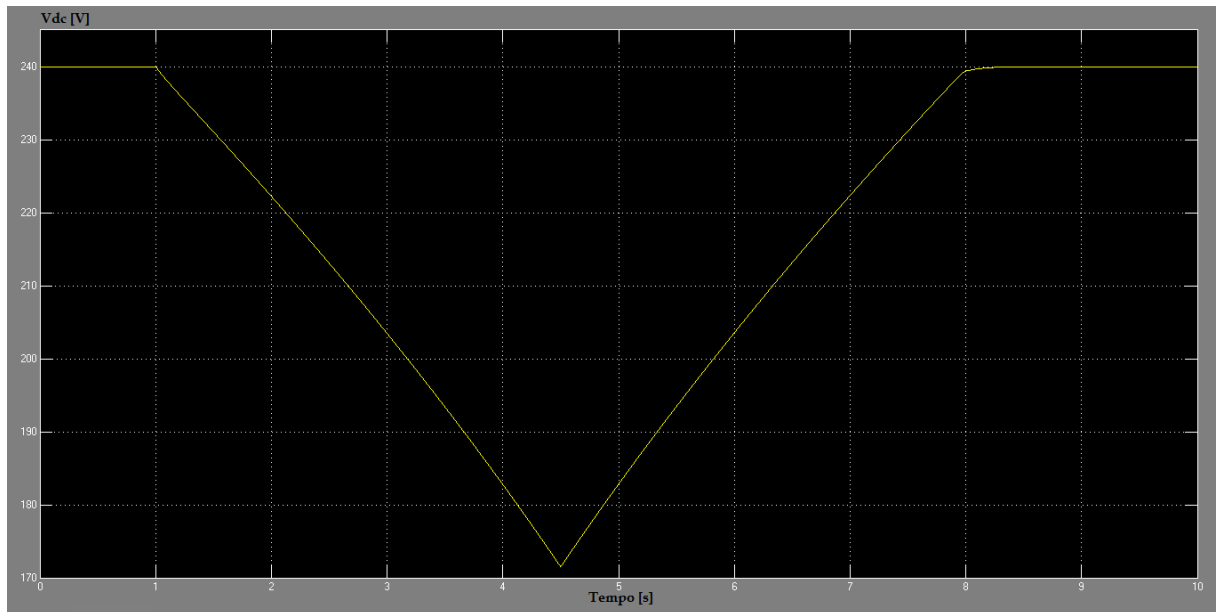


Figura 5.13: tensione lato accumulatore

La seconda grandezza osservata è la tensione lato accumulatore, come previsto la capacità utilizzata è sufficiente a mantenere la tensione al di sopra del valore minimo di 150V.

La tensione decresce fino all'istante $t=4,5s$ dove inizia la frenatura e cresce abbastanza rapidamente per tutto il suo periodo, la crescita della tensione si riduce di molto, fino a ristabilizzarsi a 240V, dopo la fine della frenatura visto che c'è solo la potenza residua data dalla rete ad incrementarla.

Confrontando questo andamento della tensione sull'accumulo con quello precedente (vedi figura 5.4) si vede che la tensione finale, oltre a essere ben lontana dai 300V massimi, alla fine del ciclo di lavoro ha raggiunto i 240V di regime.

Questo fatto è ottimo perché significa che alla fine del ciclo di lavoro si è già nelle condizioni di poterne compiere un altro.

Il rischio di sprecare energia con questo sistema di controllo, a meno di guasti, è praticamente nullo.

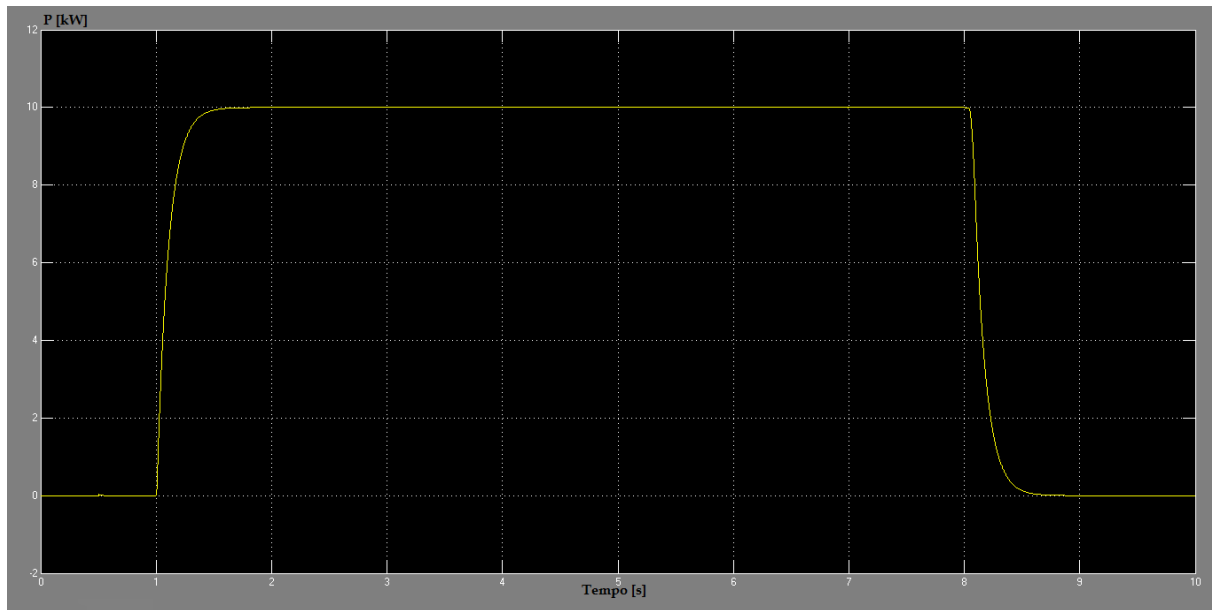


Figura 5.14: potenza erogata dalla rete

L'andamento della potenza erogata dalla rete risulta praticamente costante per tutta la durata del ciclo di lavoro: questo comportamento è dato dal fatto che ora la rete contribuisce solo a ricaricare l'accumulo ignorando completamente l'andamento del carico.

Il valore massimo di potenza erogata dalla rete risulta esattamente di 10kW, come inizialmente stabilito, e la maggiore velocità del regolatore della rete permette all'accumulo di ricaricarsi rapidamente.

La potenza erogata dalla rete sale velocemente quando si verifica l'attacco di carico e scende altrettanto velocemente quando la tensione sull'accumulo è tornata al valore desiderato.

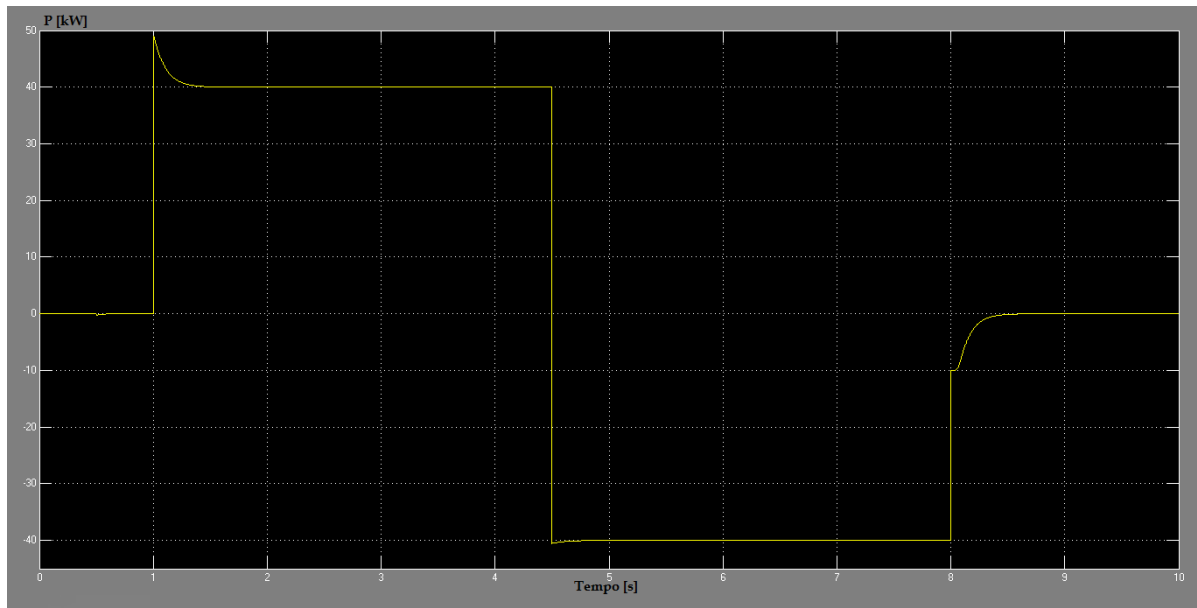


Figura 5.15: potenza erogata dall'accumulo

La potenza erogata dall'accumulo risulta molto simile a quella assorbita dal carico traslata verso il basso di 10kW.

Sull'andamento della potenza erogata dall'accumulo sono visibili anche i due transitori in cui la rete inizia e finisce di ricaricare l'accumulo, i quali sono rispettivamente all'istante $t=1s$ e all'istante $t=8s$.

L'energia che l'accumulo eroga durante la prima parte del ciclo è riassorbita totalmente durante la frenatura e, a fine ciclo, la potenza trasferita dall'accumulo risulta nulla.

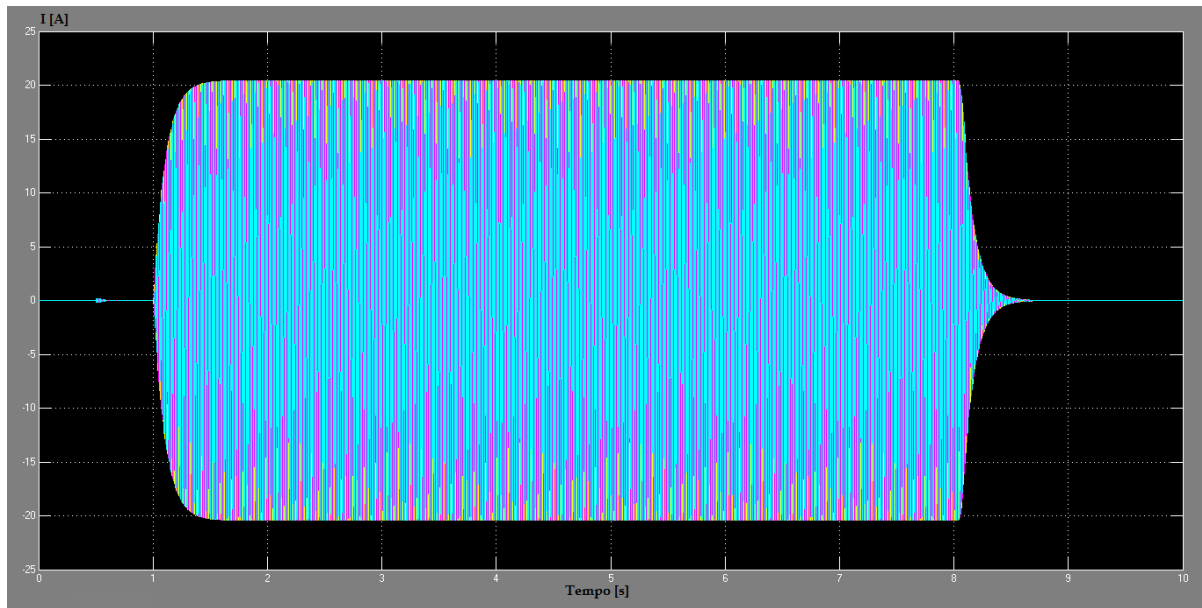


Figura 5.16: correnti lato rete

Esaminando le correnti lato rete si vede che sono così ridotte da riuscire a vedere perfino il piccolo transitorio di chiusura degli interruttori di sincronizzazione (vedi figura 3.6 per l'ingrandimento di tale transitorio).

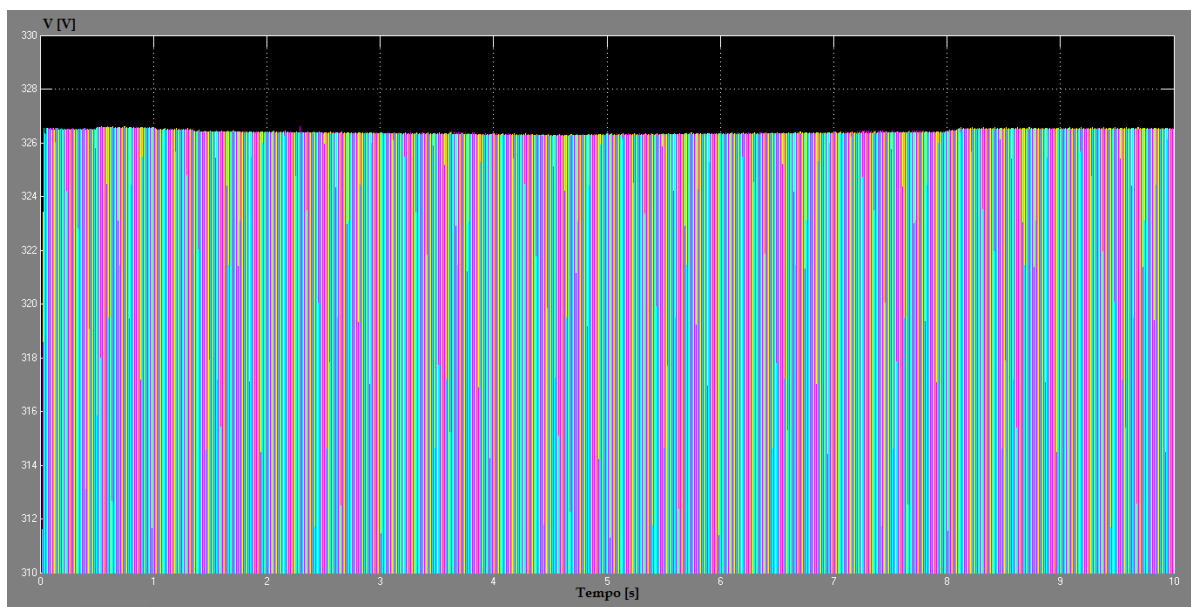


Figura 5.17: tensioni lato rete

La piccola potenza prelevata dalla rete provoca sulle tensioni della rete, che sono qui riportate ingrandite come nella simulazione 1, una caduta di tensione così piccola da non risultare quasi visibile.

SIMULAZIONE 2, CASO 4: LOGICA DI RIDUZIONE DELLA CAPACITA' IMPIEGATA PER L'ACCUMULO

In questo ultimo caso della simulazione 2 si esaminerà un altro tipo di logica di controllo dove, invece che sulla riduzione di potenza prelevata dalla rete, si punta sulla riduzione della capacità dell'accumulo.

Nonostante il maggior contributo da parte della rete rispetto al caso precedente l'accumulo deve comunque essere in grado di assorbire tutta l'energia della frenatura.

Il dimensionamento della capacità per tale energia è già stato fatto nel caso 1 di questo capitolo, la capacità impiegata è dunque di 7F.

Per quanto riguarda la logica di regolazione anche in questo caso il regolatore dell'accumulo non viene toccato ma si agisce soltanto su quello della rete.

In particolare si riduce a un valore di poco inferiore al 40% la richiesta di corrente al regolatore PI.

Si sottolinea il fatto che la riduzione non è al 40% esatto ma leggermente inferiore (39,2% per la precisione): questo perché se la riduzione fosse esattamente al 40% a fine ciclo l'accumulo si ritroverebbe con una tensione superiore ai 240V per opera del contributo di ricarica proveniente dalla rete.

In questo modo la rete tenderà a compensare solo poco meno di 20kW dei 50kW richiesti dal carico in caso di pieno carico, compenserà praticamente solo l'energia che il carico non restituisce in frenatura a causa del rendimento.

Se il carico assumesse potenze inferiori anche la compensazione sarà ovviamente inferiore.

Il regolatore della rete viene scelto abbastanza veloce: se così non fosse in caso di massimo carico e massima durata l'accumulo non riuscirebbe a coprire tutta la richiesta.

Regolatore della rete (banda passante 12Hz):

$K_p=0$

$K_i=7,5$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz):

$K_p=14$

$K_i=150$

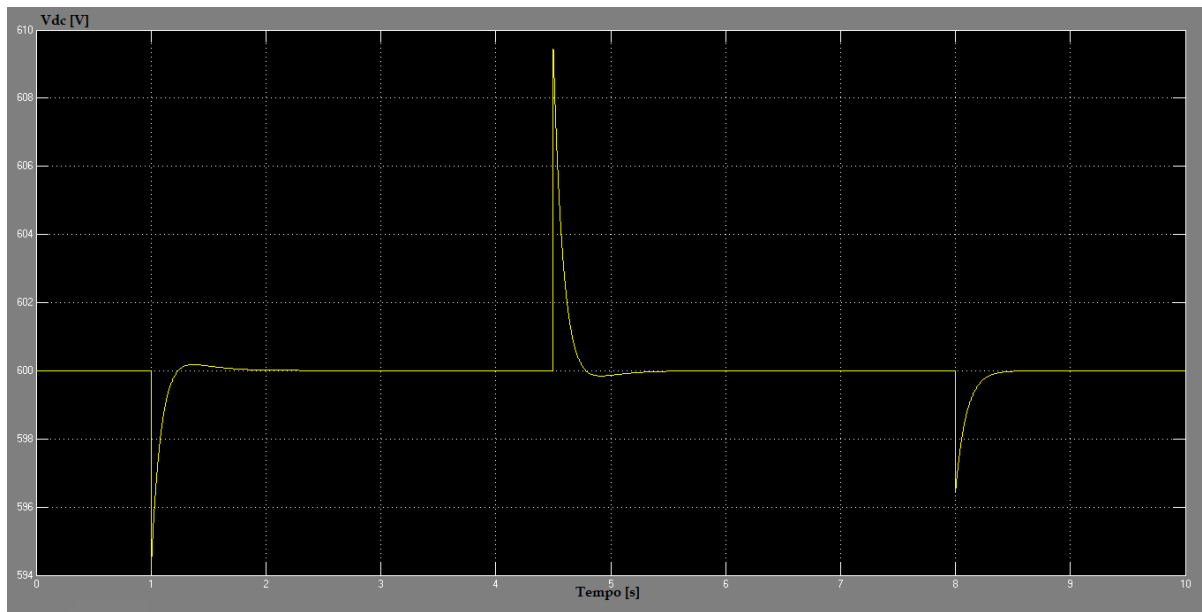


Figura 5.18: tensione lato carico

Anche in questo caso la tensione sul carico non cambia andamento rispetto ai casi precedenti.

La massima variazione di tensione rispetto alla nominale è inferiore al 2%.

In particolare la massima variazione di tensione è in aumento e raggiunge un valore di poco inferiore ai 610V.

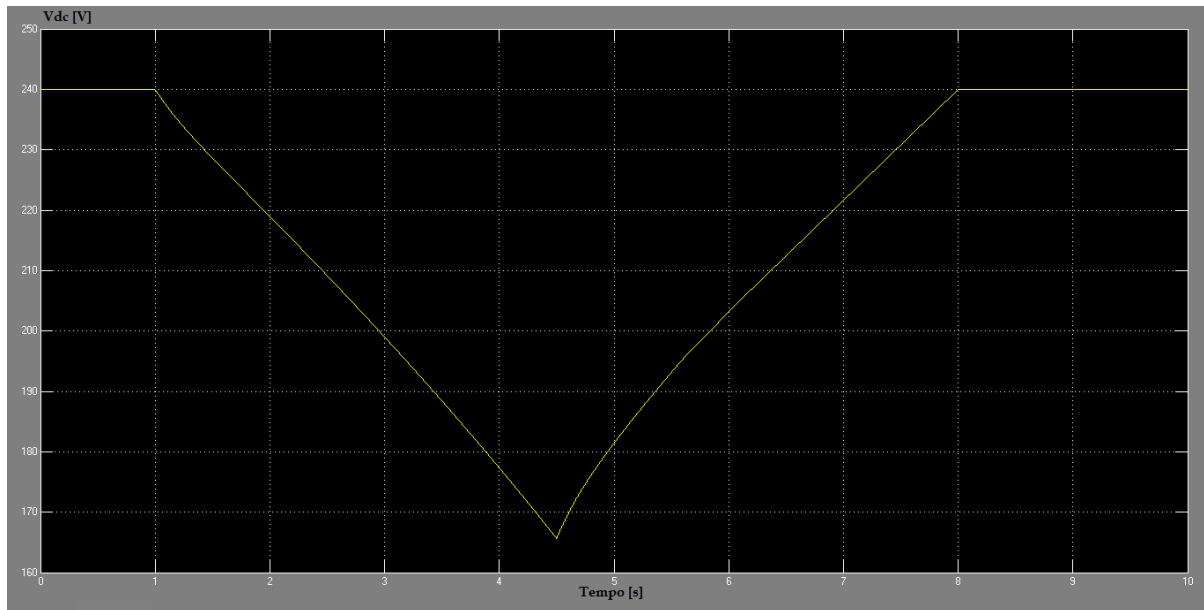


Figura 5.19: tensione lato accumulatore

La tensione sull'accumulo ha un andamento simile al caso precedente con calo rapido durante l'erogazione e ricrescita altrettanto rapida durante il recupero della frenatura.

Il minimo si presenta proprio all'istante di passaggio tra erogazione e recupero dell'accumulo e ha un valore di circa 165V.

A fine ciclo la tensione sull'accumulo è allo stesso livello dell'inizio, questo conferma i calcoli del fatto che scegliere una riduzione del 39,2% è corretto.

Se si fosse scelta una riduzione del 40% senza contributo per la ricarica dell'accumulo la simulazione darebbe (in termini di tensione sull'accumulo) gli stessi risultati, così facendo tuttavia non controllo più la tensione sull'accumulo che col tempo si scaricherebbe a causa delle perdite.

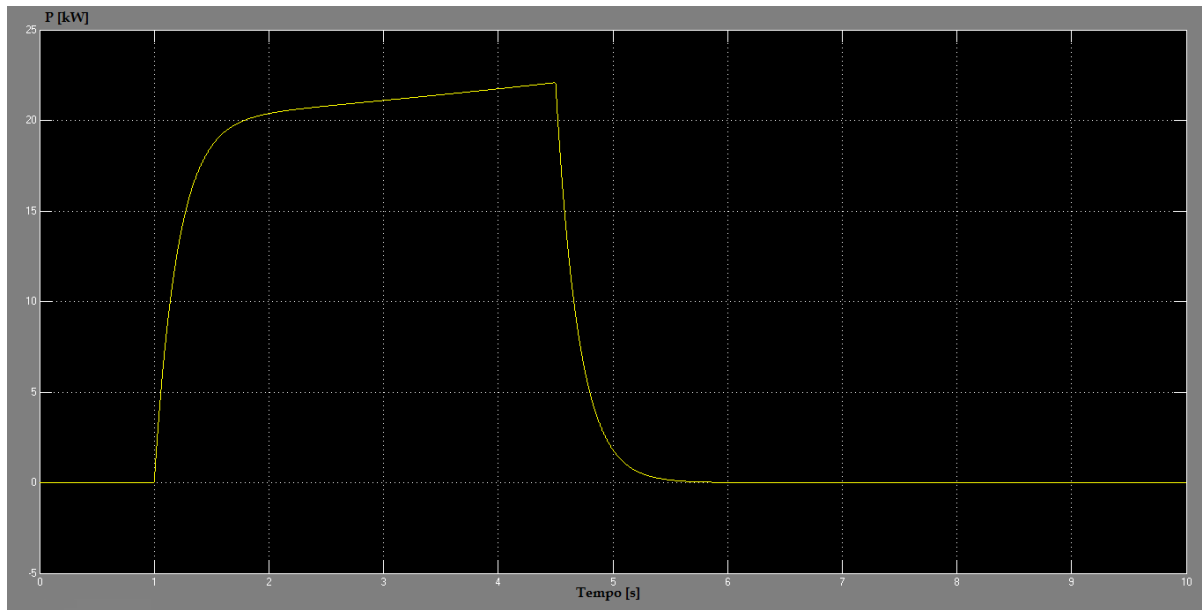


Figura 5.20: potenza erogata dalla rete

La potenza erogata dalla rete di alimentazione ha un andamento tale da coprire mediamente il 40% della potenza assorbita dal carico ed esattamente il 40% dell'energia assorbita dal carico.

Il regolatore della rete ha una velocità sufficiente a far raggiungere (e superare) alla potenza erogata dalla rete il valore di 20kW in meno di un secondo.

Come si vede dall'andamento in figura 5.20 la potenza erogata dalla rete supera i 20kW: il motivo è la presenza del contributo alla ricarica dell'accumulo.

All'inizio della frenatura la potenza erogata dalla rete ritorna a zero abbastanza velocemente.

Come già visto prima la frenatura viene ignorata dal regolatore della rete e tratta tale evento semplicemente come un distacco di carico.

Un'ultima importante considerazione riguardo alla potenza fornita dalla rete di alimentazione è che, anche se non è bassa come quella del caso precedente (vedi figura 5.14), risulta comunque molto più bassa di quella massima richiesta dal carico.

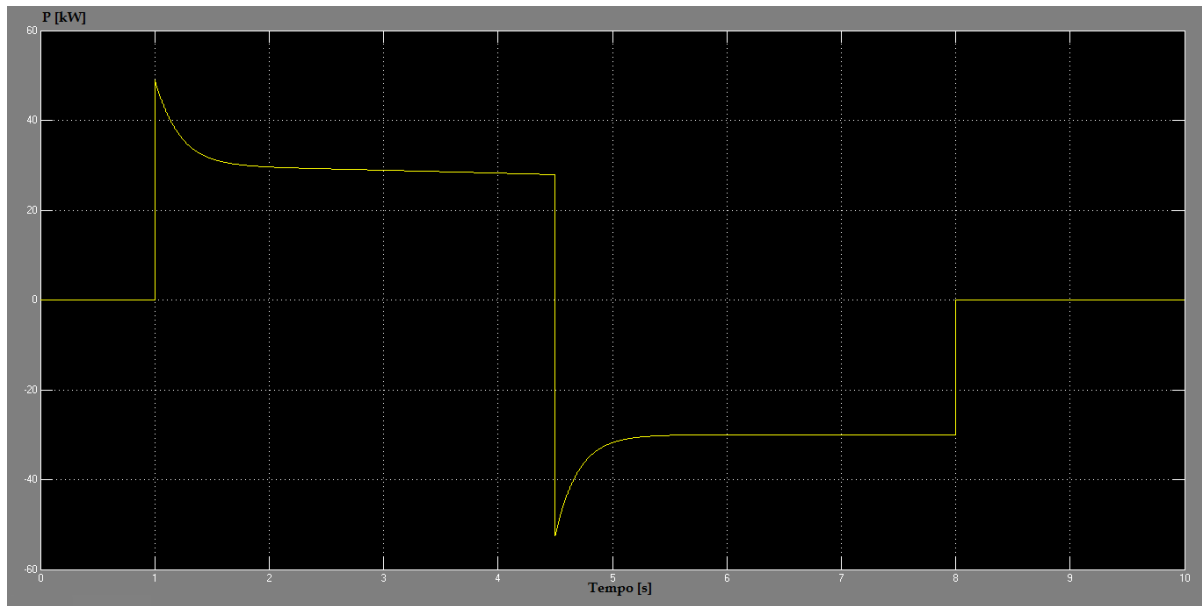


Figura 5.21: potenza erogata dall'accumulo

Dal grafico che mostra l'andamento della potenza erogata dall'accumulo si vede che il suo comportamento nella fase di recupero in frenatura è quasi uguale al suo comportamento durante la fase di erogazione, ovviamente a segno invertito.

Una leggera differenza tra le due fasi si nota nel fatto che durante la fase di recupero in frenatura, dopo il transitorio iniziale, la potenza assume un valore costante, mentre nella fase di erogazione decresce leggermente per opera del sistema di ricarica dell'accumulo.

Escludendo i due transitori, l'andamento della potenza dell'accumulo rappresenta il trasferimento della potenza non persa a causa del rendimento del carico.

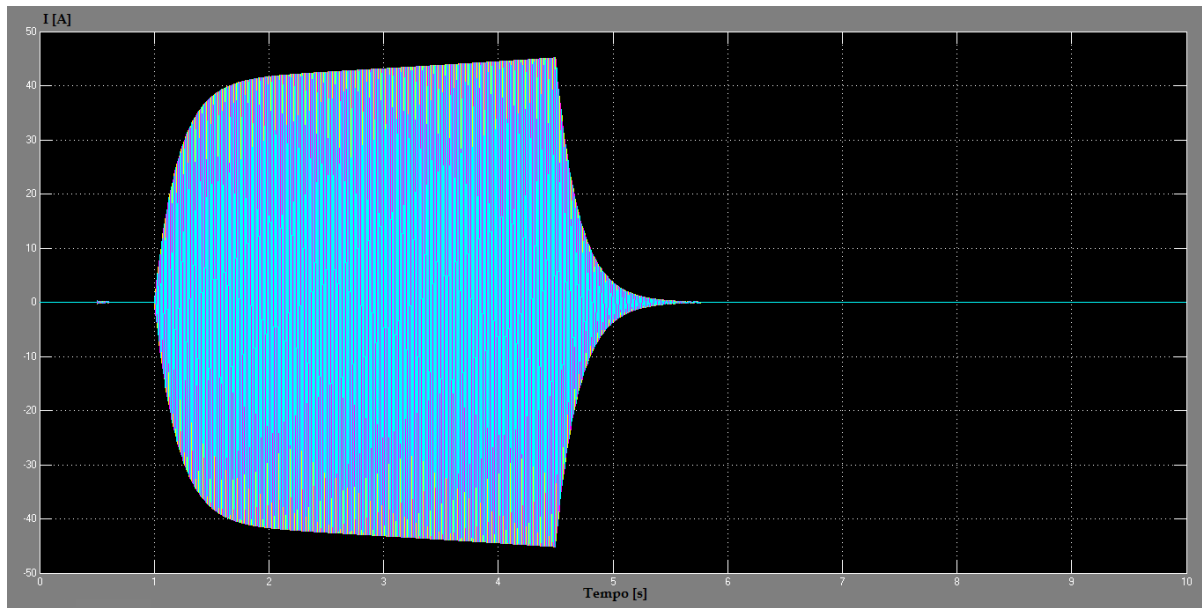


Figura 5.22: correnti lato rete

Considerando le correnti della rete in alternata, rispetto al caso precedente dove si voleva minimizzare l'assorbimento dalla rete in termini di potenza (vedi figura 5.16), in questo caso risultano più elevate ma si esauriscono prima.

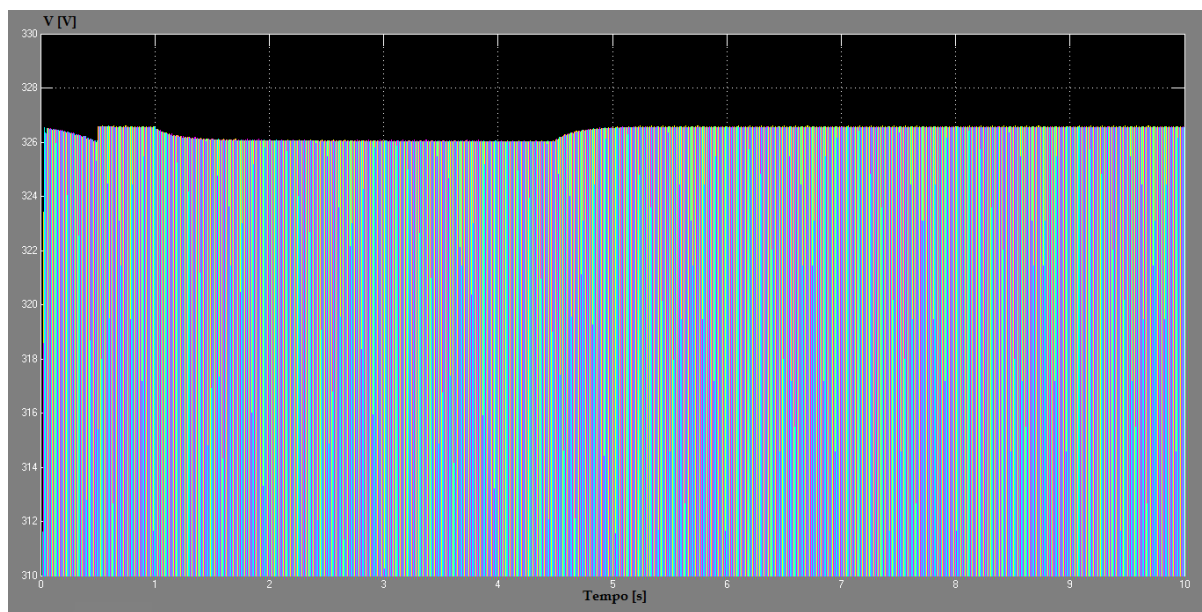


Figura 5.23: tensioni lato rete

Esaminando le tensioni sul lato in alternata del raddrizzatore e confrontandole con quelle del caso precedente (in figura 5.17) si vede che la caduta di tensione rilevata in questo caso è un po' più significativa.

Nonostante questo incremento la caduta di tensione lato alternata rimane comunque decisamente ridotta.

CAPITOLO 6:

Simulazione 3: carico disturbante

La terza simulazione riguarda il caso di un carico che assorbe potenza in modo molto variabile disturbando molto la tensione e dando problemi di flicker.

Questo andamento di potenza è tipico delle saldatrici e di molti altri carichi che prelevano potenza in modo poco costante.

In questa simulazione si vuole vedere come un sistema di accumulo possa migliorare la situazione.

Il carico utilizzato assorbe una potenza che varia da 0 a 50kW e ha un andamento ad onda quadra con frequenza della fondamentale pari a 10Hz.

Lo schema del carico in Simulink è il seguente.

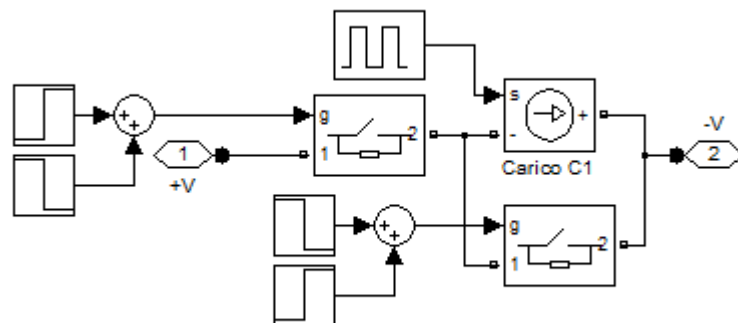


Figura 6.1: carico C

In questo caso il carico utilizzato risulta schematicamente abbastanza diverso dai precedenti.

I due blocchetti esagonali +V e -V sono i collegamenti esterni rispettivamente positivo e negativo del carico sulla rete in continua.

Per simulare la potenza variabile del carico C si utilizza un generatore di corrente pilotato etichettato come "Carico C1".

Il carico risulta quindi essere sempre a corrente costante.

Per pilotare il generatore di corrente si utilizza un generatore di segnale ad onda quadra che viene impostato con l'ampiezza e la frequenza desiderate.

Tale generatore ad onda quadra ha quindi impostata una frequenza di 10Hz e un'ampiezza (che equivale ad una corrente) di 83,33A che moltiplicata per i 600V della continua fa risultare una potenza di 50kW.

Per simulare l'attacco e il distacco di carico si utilizzano due interruttori: uno collega il generatore pilotato di corrente ai morsetti esterni mentre l'altro lo cortocircuita.

L'interruttore che collega il generatore ai morsetti esterni ha la stessa funzione di quelli dei casi precedenti, cioè di attaccare e staccare il carico dalla rete in continua.

L'interruttore che cortocircuita il generatore invece ha il compito di lasciare richiudere la corrente generata dal generatore (che imponendo la corrente non può trovare un circuito aperto) quando il carico è staccato.

I due interruttori funzionano quindi in modo duale tra loro: quando uno dei due è chiuso l'altro è aperto e viceversa.

All'istante $t=0$ l'interruttore che cortocircuita il generatore è chiuso mentre quello che lo collega ai morsetti esterni è aperto e la corrente del carico è quindi nulla.

All'istante $t=1s$ l'interruttore che collega il generatore ai morsetti esterni si chiude provocando l'attacco di carico e contemporaneamente l'altro interruttore si apre.

Infine, all'istante $t=8s$, gli interruttori cambiano nuovamente stato contemporaneamente simulando il distacco di carico.

Il distacco di carico viene fatto avvenire all'istante $t=8s$ al fine di non prolungare troppo la simulazione ma si ipotizza che questo carico possa avere una durata qualsiasi.

Per il controllo degli interruttori si utilizzano dei blocchi gradino, proprio come nelle simulazioni precedenti.

Sapendo che il valore 1 sta per "interruttore chiuso" e il valore 0 sta per "interruttore aperto" sommando i due blocchi gradino si ottiene l'apertura e la chiusura degli interruttori.

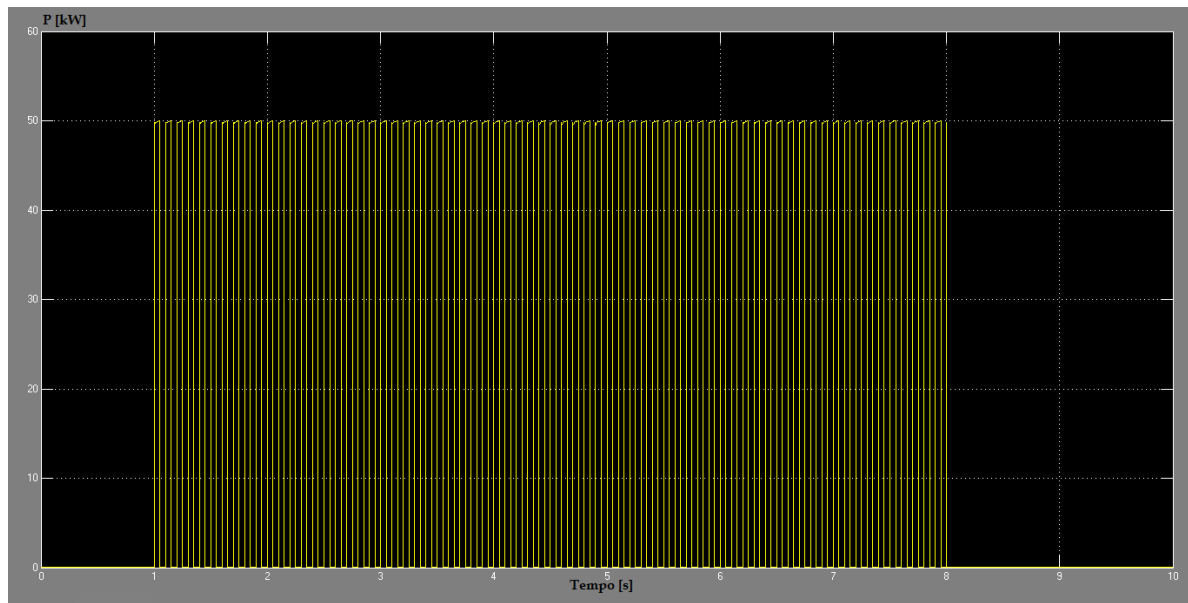


Figura 6.2: andamento della potenza assorbita dal carico C

In figura 6.2 si vede l'andamento della potenza assorbita dal carico C, la durata della simulazione è stata scelta di 10s.

Bisogna ora dimensionare la capacità dell'accumulo: contrariamente ai primi due casi il criterio di dimensionamento è più complicato non essendoci un'energia da compensare facilmente definibile.

Visto l'andamento di potenza del carico l'obiettivo è quello di far erogare alla rete una potenza il più possibile costante pari alla potenza media assorbita dal carico (cioè 25kW).

L'accumulo dovrà invece incaricarsi di eliminare il più possibile la variazione.

A regime l'accumulo dovrà scambiare quantità di energia molto piccole, per la precisione un'energia pari a metà di quella presente in un semiperiodo dell'onda quadra della potenza del carico.

Questa energia si può facilmente calcolare moltiplicando la potenza di 50kW per la durata del semiperiodo (50ms) e dividendo per 2: $W=1,25\text{kJ}$.

Se l'accumulo potesse immagazzinare solo questa quantità di energia non potrebbe tuttavia lavorare durante gli attacchi (e i distacchi) di carico, quando cioè la rete di alimentazione non sta ancora erogando i 25kW di regime.

Il dimensionamento della capacità va quindi fatto in condizione di attacco di carico: l'accumulo dovrà inizialmente essere in grado di fornire tutta l'energia richiesta dal carico.

Per conoscere questa energia bisogna fare una stima del tempo in cui la rete di alimentazione sarà vicina al regime con un certo margine di sicurezza.

Una stima di tempo ragionevole, considerando anche che il regime è di 25kW invece che 50kW e la rete aumenta ad ogni periodo la sua potenza erogata, può essere di 2s.

L'energia che il carico assorbe in 2 secondi è facilmente calcolabile moltiplicando i 2 secondi per i 25kW di potenza media assorbita dal carico: $W_{2s}=50kJ$.

La ΔV ammissibile sull'accumulo è da 240V a 150V quindi posso calcolare il valore della capacità:

$$C=2*W_{2s}/\Delta V^2=2*50k/(240^2-150^2)=2,849F$$

Che per sicurezza e per avere un valore standard arrotondo a 3F.

Anche in questo caso il valore di capacità ottenuto è compatibile con l'impiego dei supercondensatori.

La correttezza del valore ottenuto verrà comunque successivamente controllata attraverso i valori assunti dalla tensione sull'accumulo.

SIMULAZIONE 3, CASO 1: ACCUMULO POCO INFLUENTE

In questo primo caso esaminato considereremo il comportamento delle varie grandezze nel caso non sia presente il sistema di accumulo.

In realtà, per motivi relativi al buon funzionamento del modello in Simulink, l'accumulo non viene effettivamente rimosso ma si tarano i regolatori in modo tale che esso risulti inefficace e influisca poco.

In particolare si imposta il regolatore della rete con un K_i più elevato di quello del regolatore dell'accumulo.

Regolatore della rete (banda passante 65Hz (2,2kHz)):

$K_p=0$ (14)

$K_i=75$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz (23Hz)):

$K_p=14$ (0)

$K_i=15$

Come si vede il K_i della rete è ora superiore a quello dell'accumulo.

Per quanto riguarda i K_p invece, essi vengono, per necessità legate al corretto funzionamento del modello, mantenuti come nei casi precedenti.

I valori teorici dei K_p sono riportati tra parentesi tonde accanto ai valori utilizzati nel modello (e anche la relativa banda passante): essi stanno a significare che nella realtà, se non è presente l'accumulo, è la rete a compensare i gradini di potenza.

Il comportamento del modello così impostato è comunque molto simile al comportamento di una rete senza accumulo.

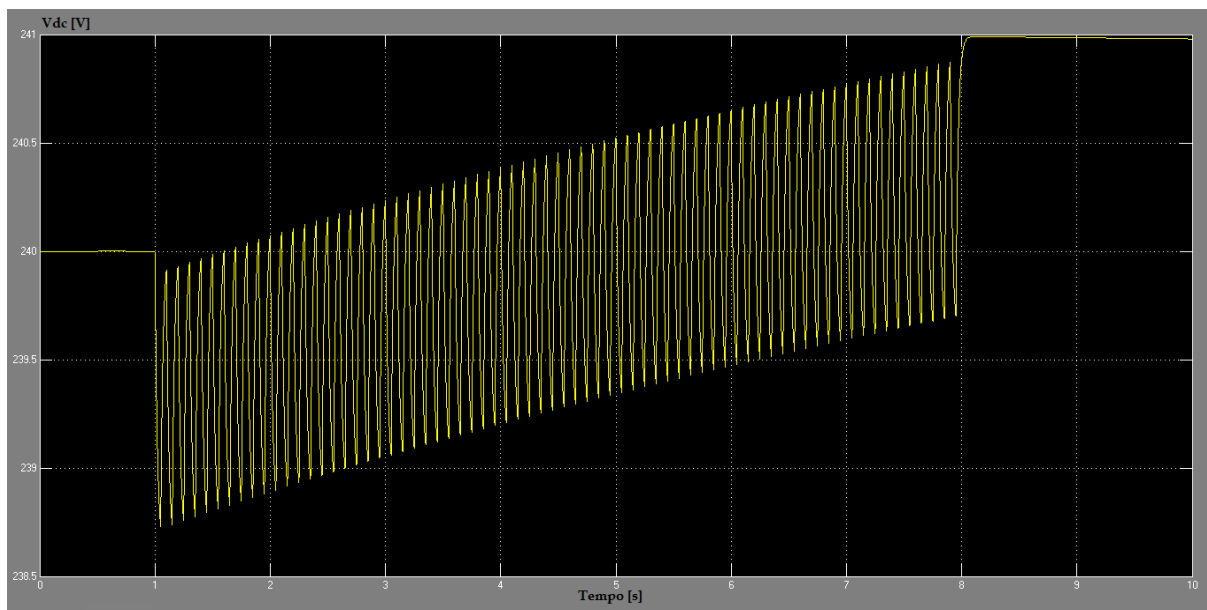


Figura 6.3: tensione lato accumulo

Dalla figura 6.3 che mostra la tensione sull'accumulo si può aver la conferma che esso ha poca influenza.

La tensione sull'accumulo varia infatti, rispetto al suo valore medio di 240V, di massimo poco più di 1V con una capacità di 3F.

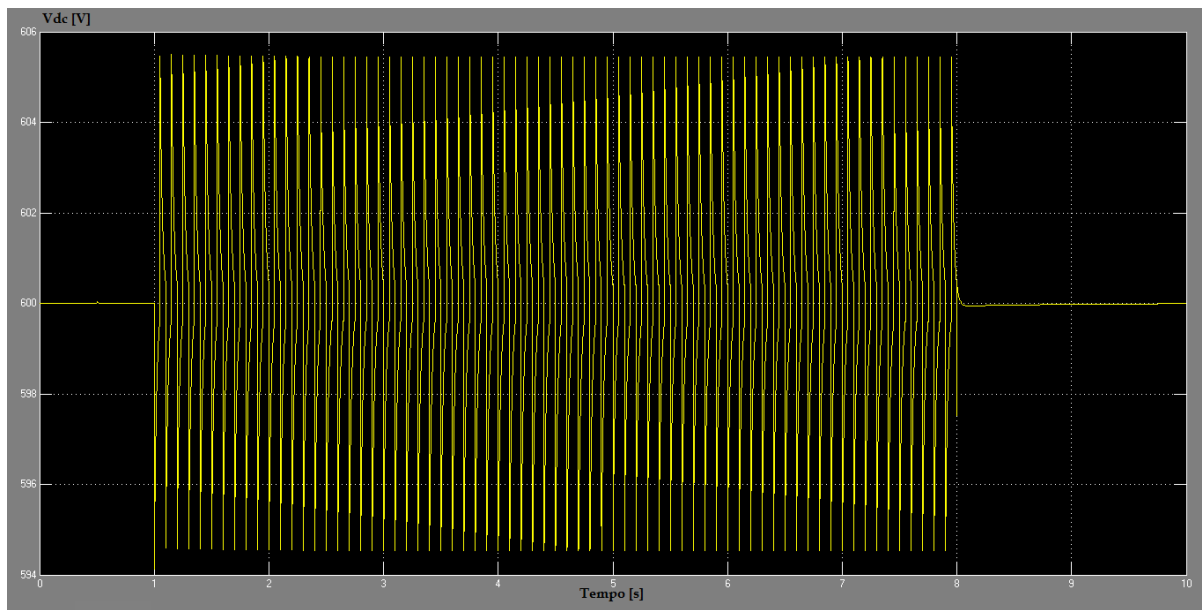


Figura 6.4: tensione lato carico

La tensione sul carico risulta piuttosto disturbata ma viene comunque contenuta entro valori accettabili.

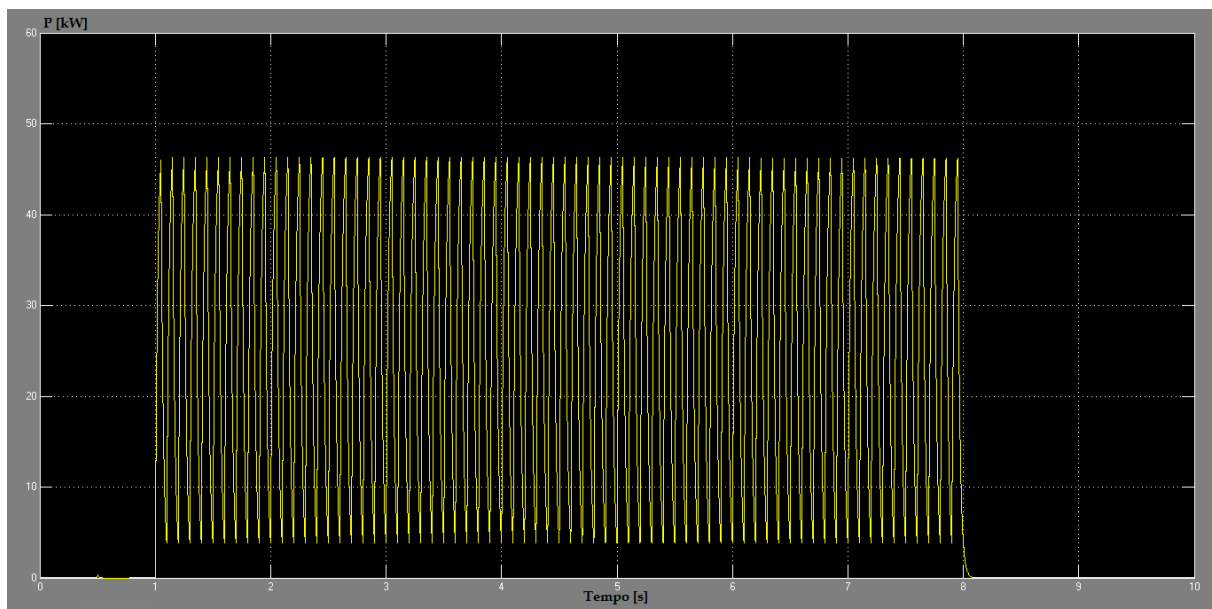


Figura 6.5: potenza erogata dalla rete

La figura 6.5 mostra l'effetto della forte variabilità del carico sulla potenza prelevata dalla rete.

Una potenza con un andamento simile, oltre a causare molte perdite, provoca significative oscillazioni sulla tensione e si manifesta sui carichi vicini il fastidioso fenomeno del flicker.

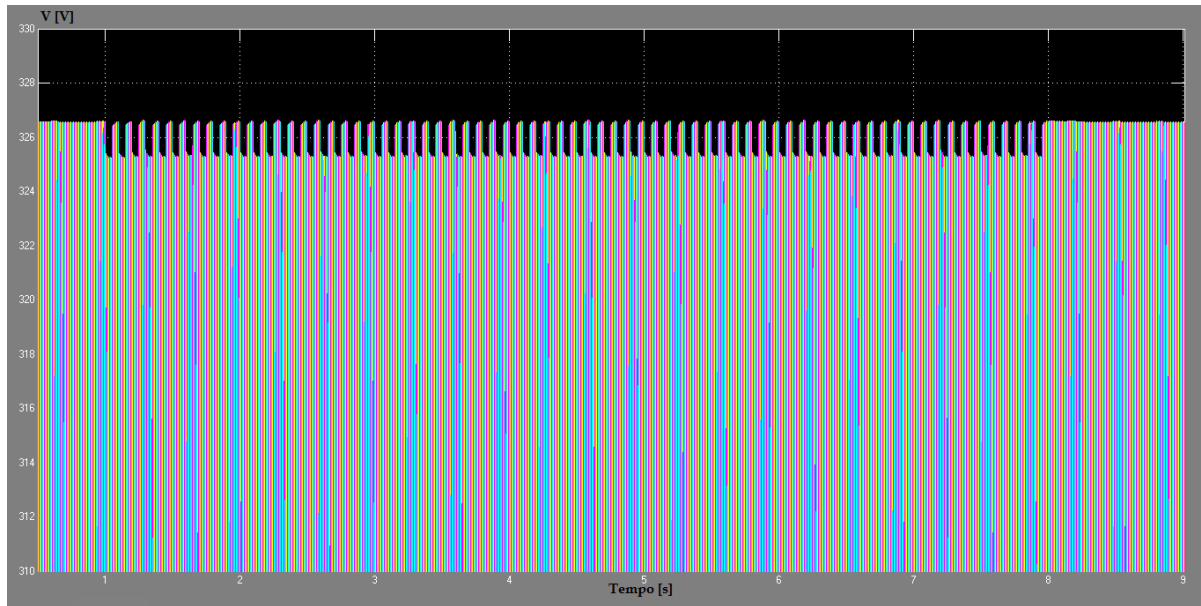


Figura 6.6: tensioni lato rete

Come anticipato, sulle tensioni della rete si manifestano delle oscillazioni, che generano flicker, perdite e armoniche.

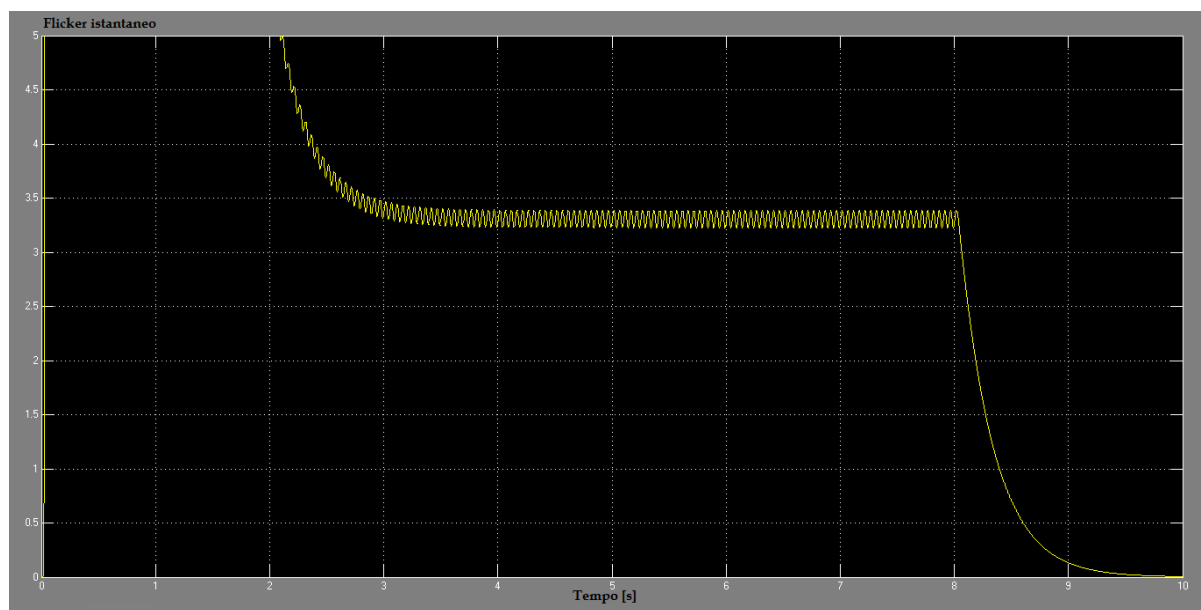


Figura 6.7: flicker istantaneo

Come ultima grandezza, in figura 6.7, viene mostrata l'uscita del flickermetro: è opportuno ignorare il transitorio iniziale che è dovuto alla sincronizzazione e considerare solo il valore di regime.

Il valore di flicker misurato in questo caso è intorno a 3,3: l'obiettivo del prossimo caso di questa simulazione è quello di vedere come l'impiego di un sistema di accumulo possa migliorare la situazione e ridurre quindi questo valore.

Poiché il fine di questa simulazione è quello di valutare il miglioramento che la presenza di un sistema di accumulo comporta in caso di flicker e non di analizzare tale fenomeno nei dettagli, non verranno fatte ulteriori considerazioni su questo valore misurato.

SIMULAZIONE 3, CASO 2: UTILIZZO DI ACCUMULO PER LA COMPENSAZIONE DEL FLICKER

In questo secondo caso esaminato considereremo il comportamento delle varie grandezze nel caso il sistema di accumulo sia invece presente.

I regolatori vengono tarati come quelli ottimali della prima simulazione in modo da avere l'accumulo molto più veloce della rete, in modo quindi da scaricare il più possibile su di esso le variazioni di potenza.

Regolatore della rete (banda passante 0,9Hz):

$K_p=0$

$K_i=0,75$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz):

$K_p=14$

$K_i=150$

Come si vede il K_i del regolatore dell'accumulo è molto superiore a quello del regolatore della rete.

In questo modo la rete di alimentazione sentirà molto poco le variazioni di potenza e a regime tenderà a fornire la potenza media mentre l'accumulo compenserà le oscillazioni.

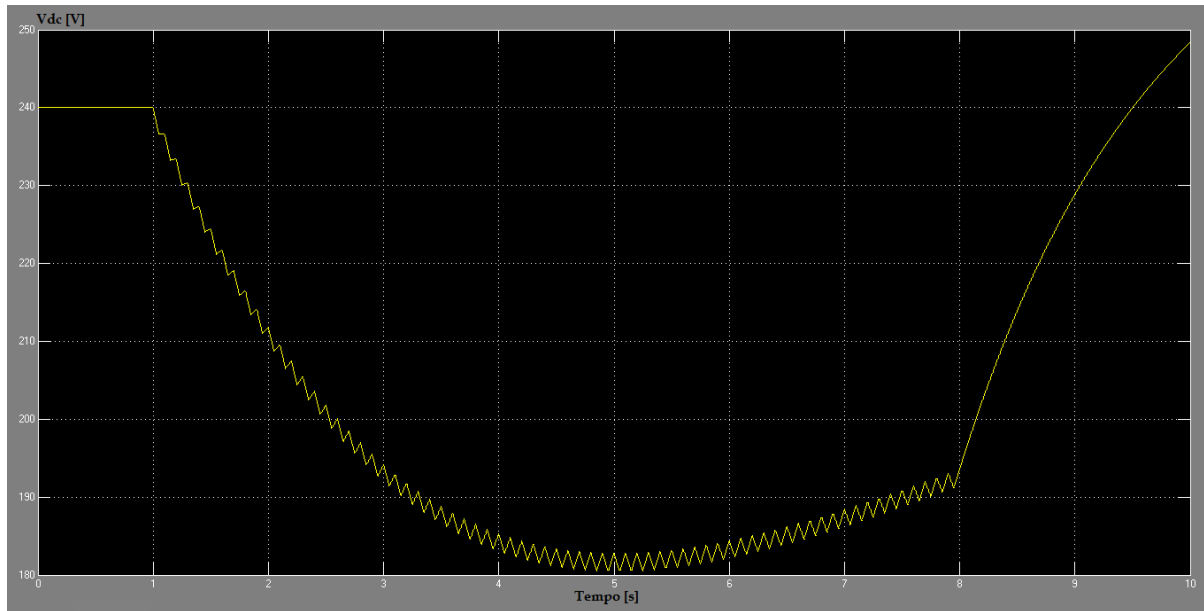


Figura 6.8: tensione lato accumulo

Confrontando la tensione sull'accumulo misurata in questo caso, in figura 6.8, con quella del caso precedente, in figura 6.3, si nota che ora l'accumulo dà un contributo significativo.

La tensione dell'accumulo scende fino a un valore minimo di 180V, senza raggiungere la soglia limite di 150V: questo conferma che una capacità di 3F è sufficiente per questa applicazione.

In realtà, come nella prima simulazione, anche con questo carico, quando disalimentato, la tensione sull'accumulo si troverebbe a un valore superiore ai 240V impostati come partenza.

Per semplicità e per il fatto che questa simulazione è finalizzata alla valutazione del flicker e non alla valutazione dei carichi ciclici il valore di tensione reale di partenza non è stato calcolato.

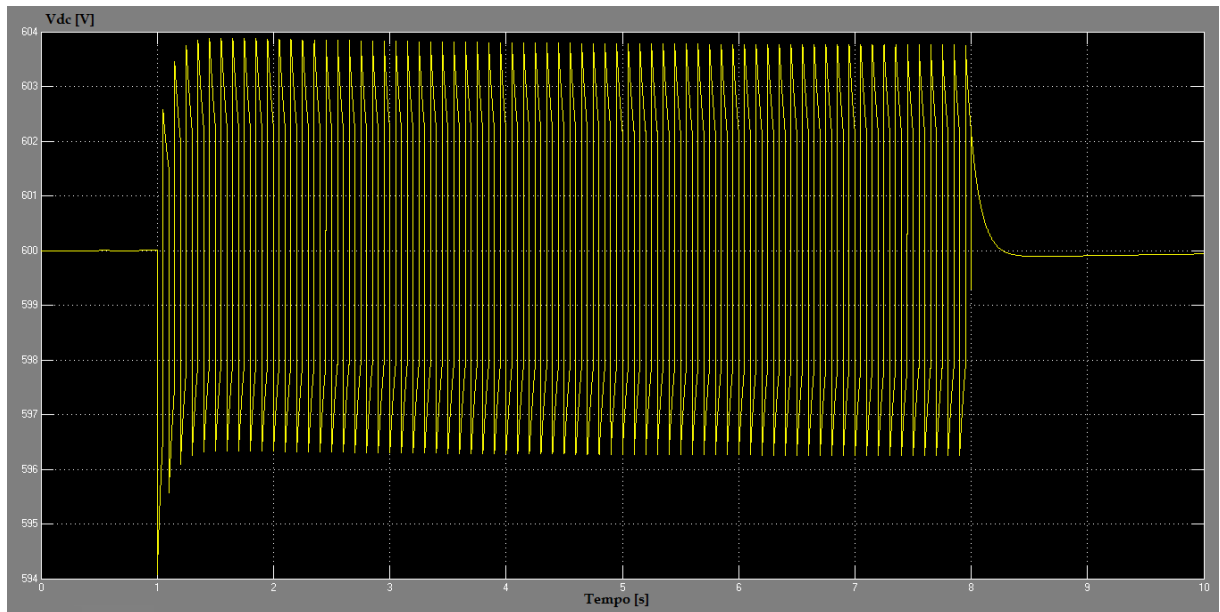


Figura 6.9: tensione lato carico

La tensione sul carico risulta anche in questo caso piuttosto disturbata.

L'ampiezza delle oscillazioni, che già nel caso precedente era contenuta, risulta adesso ulteriormente ridotta (da 6V a 4V di scarto massimo).

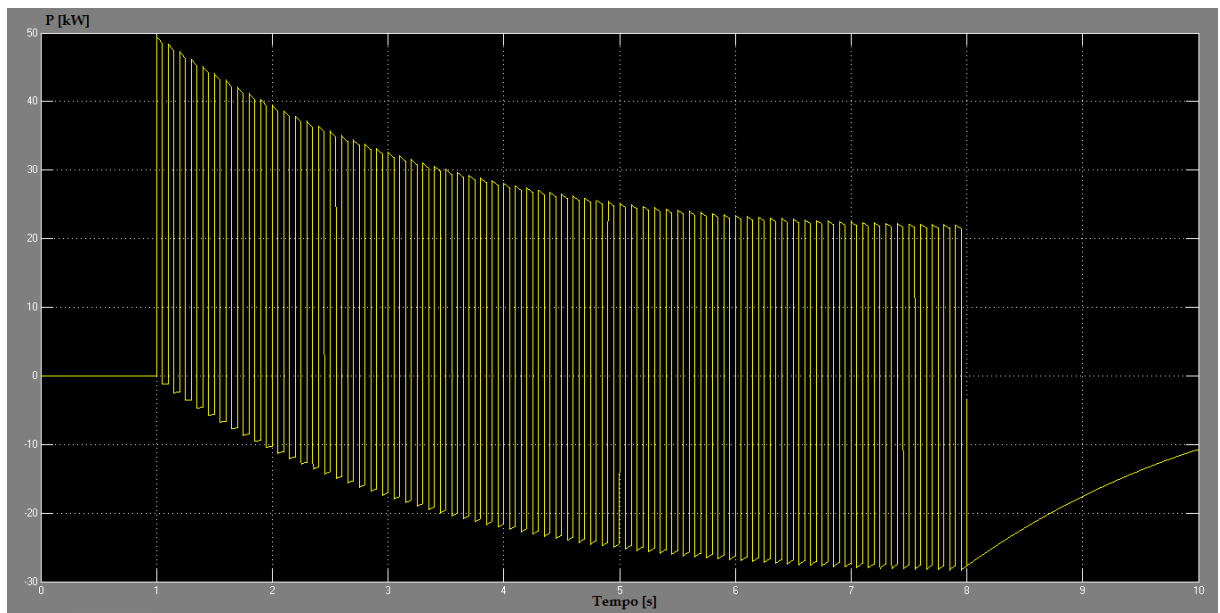


Figura 6.10: potenza erogata dall'accumulo

La potenza erogata dall'accumulo ha un andamento fortemente variabile che rispecchia quello della potenza del carico.

A regime la potenza media erogata dall'accumulo tende a zero.

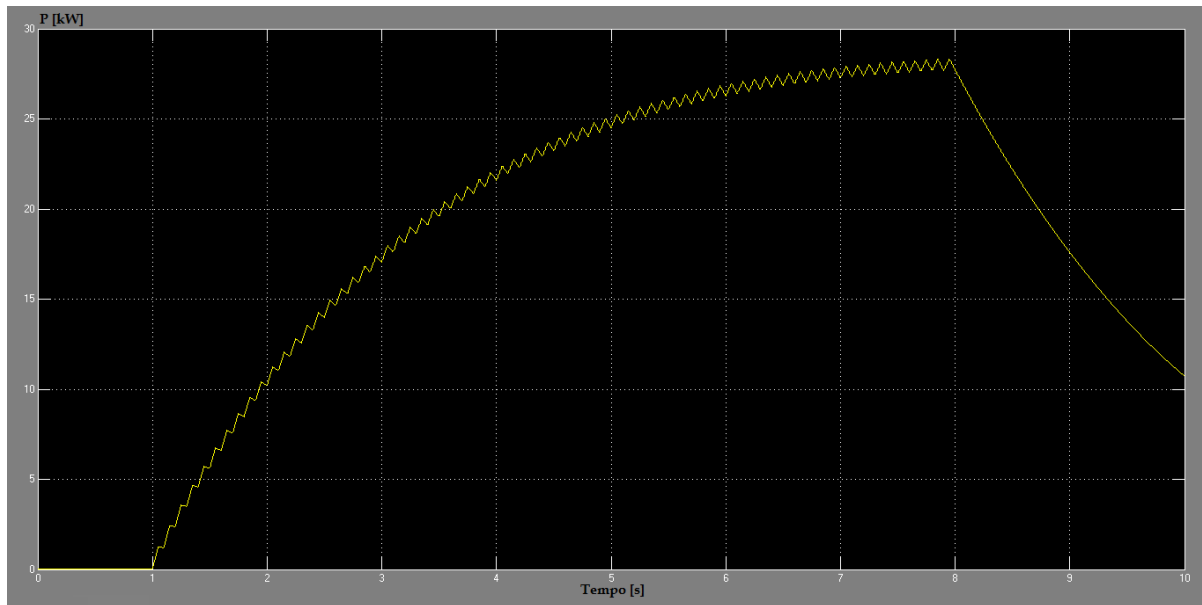


Figura 6.11: potenza erogata dalla rete

La potenza prelevata dalla rete ha in questo caso un andamento molto meno disturbato di quello del caso precedente (in figura 6.5).

A regime la potenza erogata dalla rete tende al valore di 25kW, cioè il valore medio della potenza assorbita dal carico.

In figura 6.11 si nota che la potenza erogata dalla rete tende in realtà a un valore superiore ai 25kW: questo perché inizialmente deve anche ricaricare l'accumulo che durante l'attacco di carico si è scaricato.

L'andamento della potenza non è totalmente privo di oscillazioni e quindi esse si manifesteranno anche sulla tensione.

Tuttavia, rispetto al caso precedente, queste oscillazioni sono nettamente inferiori e ci si aspetta un significativo miglioramento dal punto di vista del flicker.

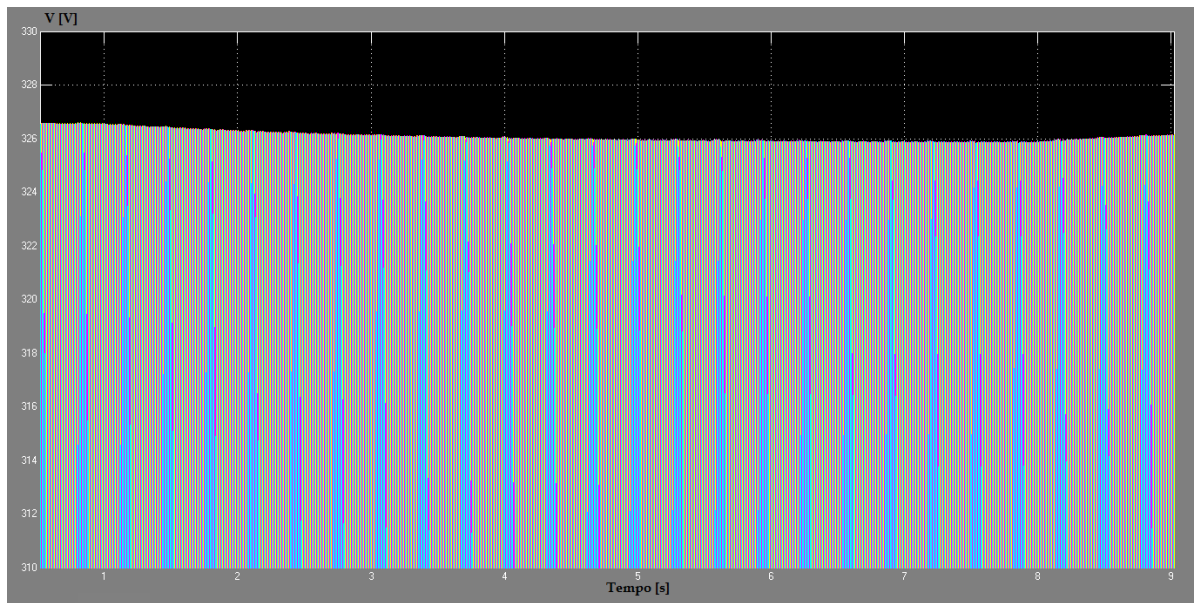


Figura 6.12: tensioni lato rete

Come atteso, le oscillazioni causate dal trasferimento di potenza sulle tensioni della rete risultano molto ridotte, soprattutto se paragonate a quelle del caso precedente (in figura 6.6).

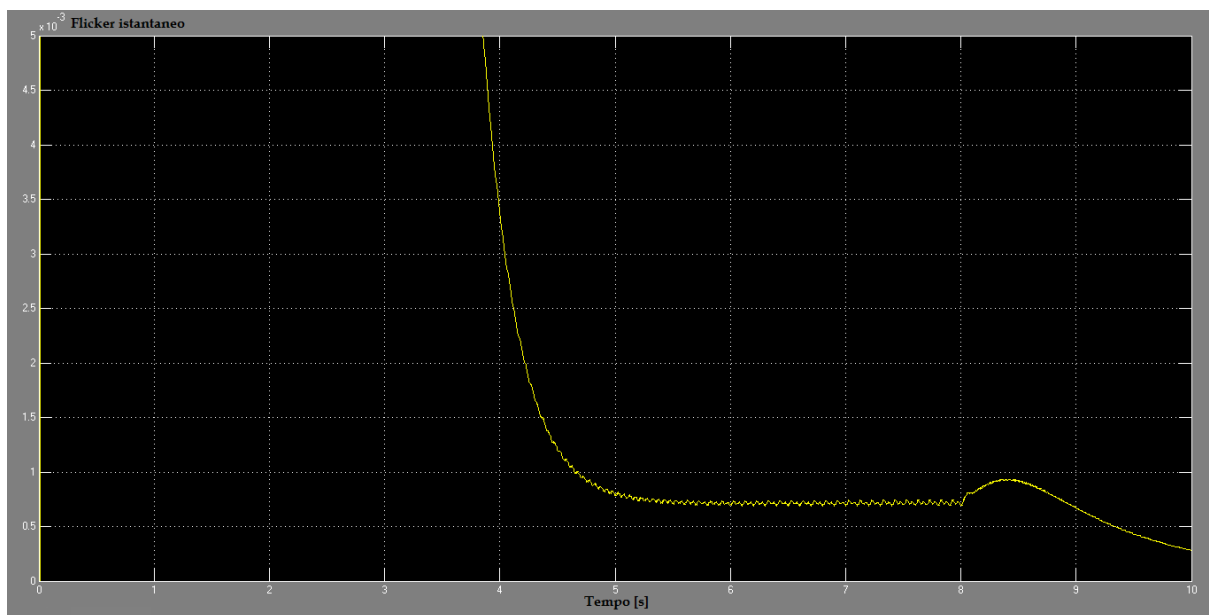


Figura 6.13: flicker istantaneo

Come ultima grandezza, in figura 6.13, viene mostrata l'uscita del flickermetro: è opportuno ignorare il transitorio iniziale che è dovuto alla sincronizzazione e considerare solo il valore di regime.

Il valore di flicker misurato in questo caso è intorno a $7 \cdot 10^{-4}$: come verificato l'impiego di un sistema di accumulo migliora significativamente questo valore che risulta più basso di quattro ordini di grandezza rispetto a quello trovato nel caso precedente.

Poiché il fine di questa simulazione è quello di valutare il miglioramento che la presenza di un sistema di accumulo comporta in caso di flicker e non di analizzare tale fenomeno nei dettagli, non verranno fatte ulteriori considerazioni su questo valore misurato.

CAPITOLO 7:

Simulazione 4: buco di tensione

L'ultima simulazione riguarda il caso di un buco di tensione.

Contrariamente alle simulazioni precedenti, dove l'accumulo era impiegato per migliorare il comportamento del carico, in questa l'accumulo è utilizzato per impedire che un malfunzionamento sulla rete interferisca sul corretto funzionamento del carico.

Il carico trattato in questo caso è un normale carico con potenza nominale di 50kW, lo schema in Simulink è il seguente.

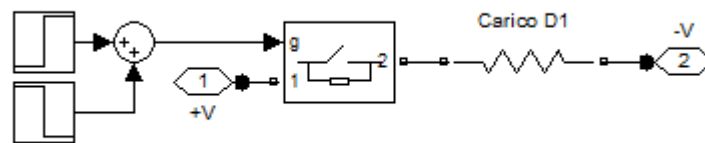


Figura 7.1: carico D

Questo ultimo carico utilizzato è il più semplice di tutti, è infatti composto da un solo ramo con una resistenza "Carico D1".

Anche in questo caso il carico è quindi modellizzato a resistenza costante.

I due blocchetti esagonali +V e -V sono i collegamenti esterni rispettivamente positivo e negativo del carico sulla rete in continua.

Per simulare l'attacco e il distacco di carico si utilizza, come nelle precedenti simulazioni, un interruttore comandato dalla somma di due segnali a gradino.

Sapendo che il valore 1 sta per "interruttore chiuso" e il valore 0 sta per "interruttore aperto" sommando i due blocchi gradino si ottiene l'attacco e il distacco di carico.

All'istante $t=0$ entrambi l'interruttore è aperto e la corrente è nulla.

All'istante $t=1s$ l'interruttore si chiude simulando l'attacco di carico.

Il distacco di carico viene effettuato all'istante $t=13s$.

In questa simulazione l'attacco e il distacco di carico sono privi di importanza poiché si ipotizza che il buco di tensione si manifesti quando la rete è a regime.

L'attacco di carico è però necessario per permettere la corretta sincronizzazione della rete in alternata che deve partire a carico nullo.

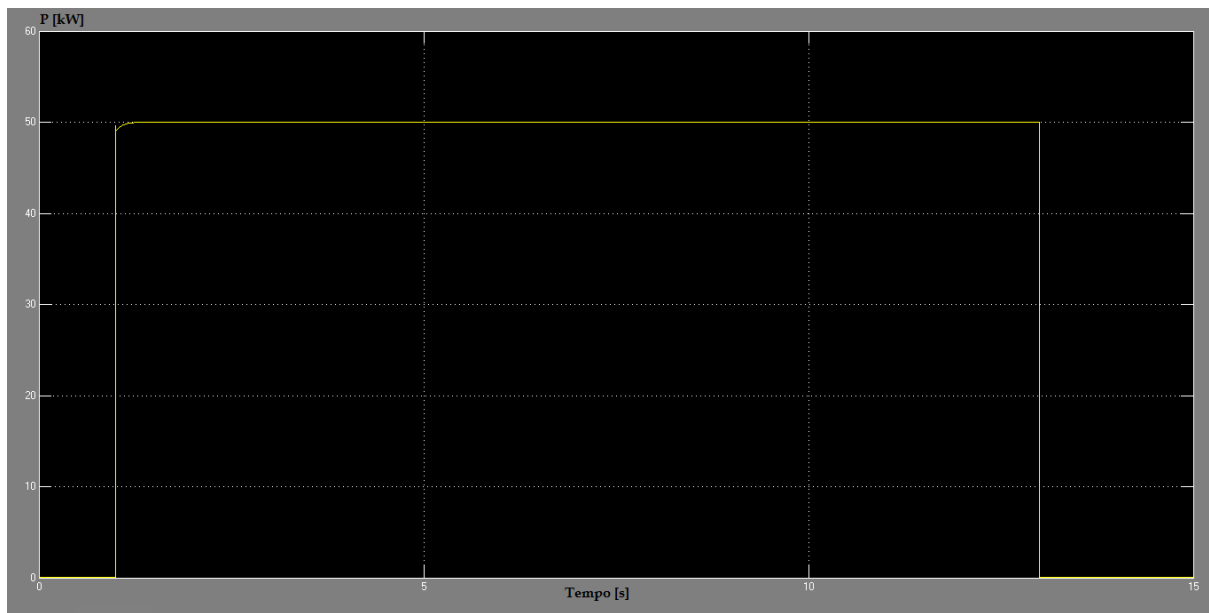


Figura 7.2: andamento della potenza assorbita dal carico D

In figura 7.2 si vede l'andamento della potenza assorbita dal carico D, la durata della simulazione è stata scelta di 15s.

Bisogna ora affrontare il problema del valore da assegnare alla capacità dell'accumulo considerando che, contrariamente agli altri casi, l'entità della perturbazione non può essere nota a priori.

Il valore di capacità dell'accumulo potrebbe essere calcolato su base statistica in funzione dei valori di ampiezza e di durata dei buchi di tensione rilevati precedentemente sulla rete di alimentazione.

Dato che l'obiettivo di questa simulazione, non è quello di progettare sistemi di accumulo su basi statistiche relative ai buchi di tensione, ma è quello di vedere l'effetto di tali sistemi su questo tipo di perturbazioni, tale calcolo non verrà svolto.

La scelta della capacità dell'accumulo è quindi effettuata riprendendo lo stesso valore di 6F della prima simulazione: ipotizzando quindi che l'accumulo non sia stato progettato appositamente per contrastare i buchi di tensione, ma che svolga il ruolo di protezione contro di essi come vantaggio aggiuntivo del suo impiego.

SIMULAZIONE 4, CASO 1: BUCO DI TENSIONE DA 200ms

In questo primo caso esaminato considereremo un buco di tensione la cui durata è di 200ms e la cui entità è tale da ridurre l'ampiezza delle tensioni del 90%.

Vista la scelta di utilizzare la capacità dell'accumulo dimensionata sulla prima simulazione, anche i regolatori sono considerati gli stessi.

In particolare si utilizzano i regolatori trovati nel terzo caso della prima simulazione, cioè quelli che in tale simulazione davano i risultati migliori.

Regolatore della rete (banda passante 0,9Hz):

$K_p=0$

$K_i=0,75$

Regolatore dell'accumulo (banda passante 2,2kHz):

$K_p=14$

$K_i=150$

La rete risulta assai lenta, per vedere l'effetto del buco di tensione in uno stato vicino a quello di regime utilizzeremo due accorgimenti:

- La tensione iniziale dell'accumulo è di 280V (invece che 240V): questo per ridurre la corrente prelevata dalla rete per la ricarica in seguito all'attacco di carico e per avere la tensione sull'accumulo, nel momento in cui si verifica il buco di tensione sulla rete a.c., di valore più vicino ai 240V di regime.
- Faremo avvenire il buco di tensione a partire dall'istante $t=9s$: il motivo è sempre quello di raggiungere una condizione più vicina al regime.

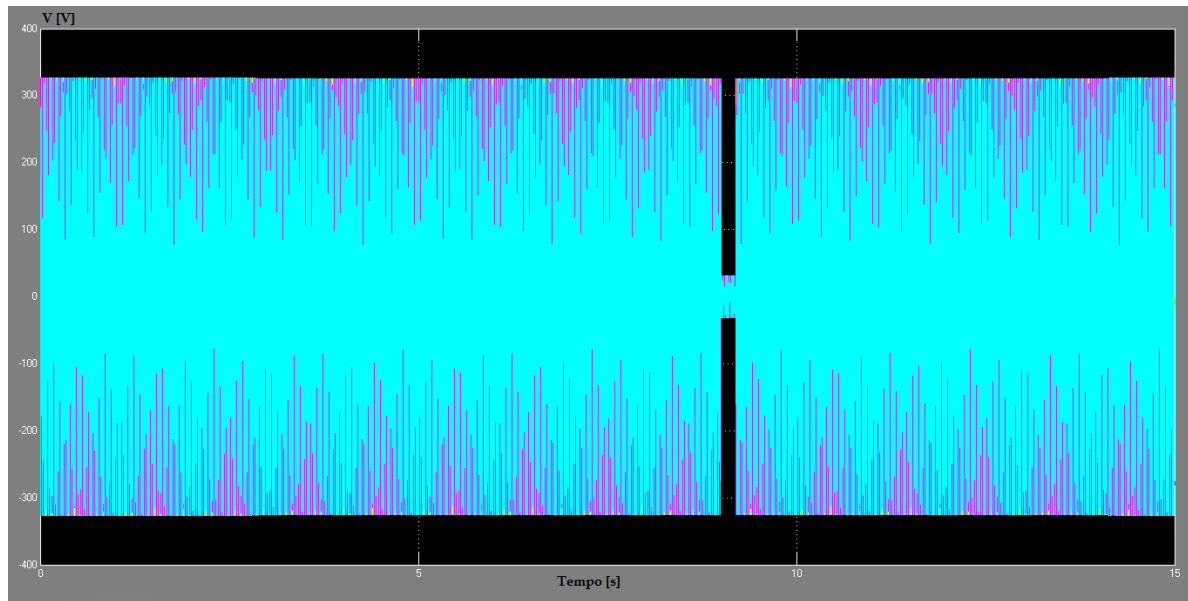


Figura 7.3: tensioni lato rete

Come prima cosa si esamina l'andamento delle tensioni sulla rete in alternata: il buco di tensione si vede chiaramente tra gli istanti $t=9s$ e $t=9,2s$.

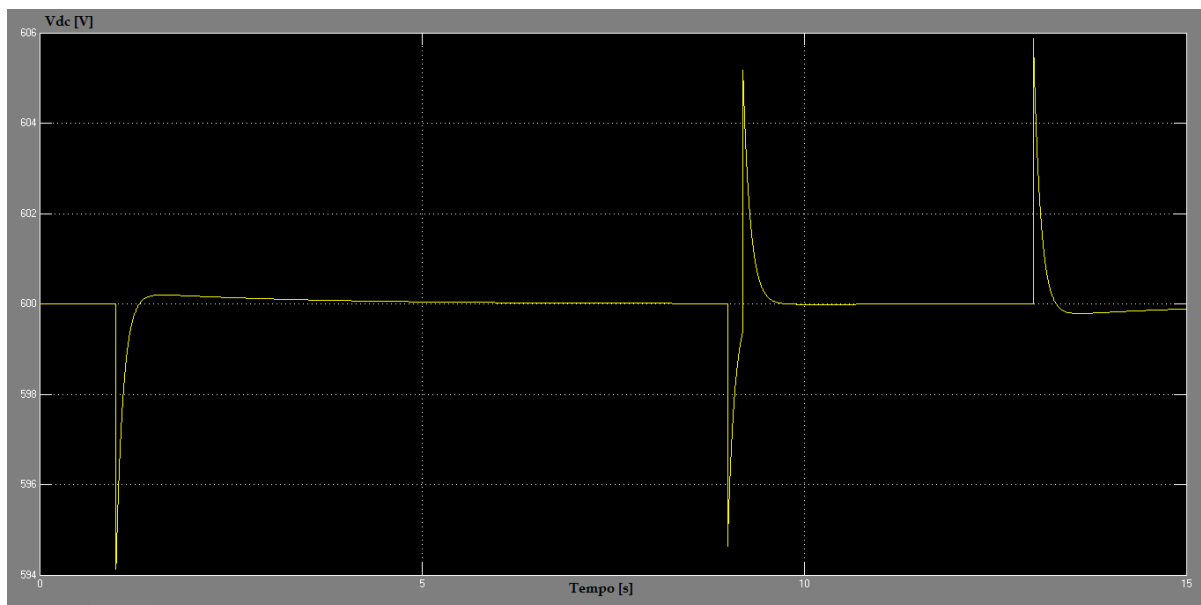


Figura 7.4: tensione lato carico

La seconda tensione visualizzata è la tensione sul carico: il buco di tensione presente sulla rete in alternata ha come effetto sul carico il doppio transitorio che parte all'istante $t=9s$ in figura 7.4.

Confrontando tale doppio transitorio con il transitorio di distacco di carico (cioè quello a destra in figura 7.4) si può vedere come il suo valore, grazie alla presenza dell'accumulo, sia molto limitato e non provochi quindi particolari problemi.

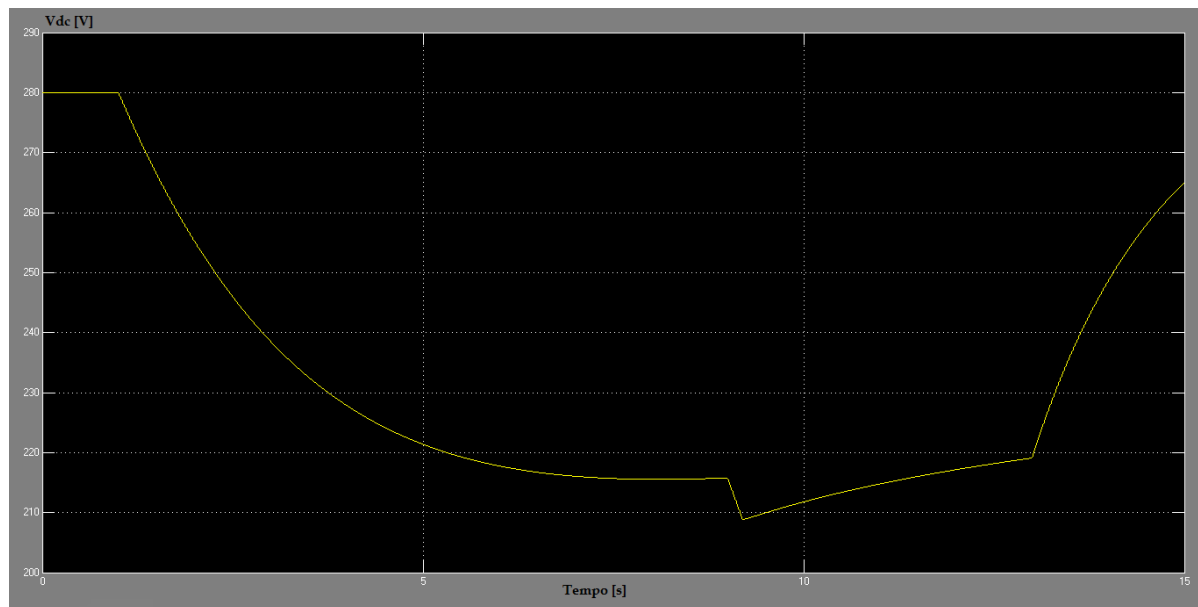


Figura 7.5: tensione lato accumulo

L'ultima tensione esaminata è quella sull'accumulo: come precedentemente accennato il modello non è esattamente a regime e questo fatto si vede chiaramente dall'andamento della tensione sull'accumulo in figura 7.5.

Nonostante questo inconveniente il comportamento della tensione sull'accumulo in caso di buco di tensione risulta chiaro esaminando l'andamento tra i 9s e i 13s della simulazione.

Appena il buco di tensione si verifica l'accumulo interviene e di conseguenza la sua tensione scende rapidamente, in questo caso in particolare scende di circa 7V.

Quando il buco di tensione termina la tensione sull'accumulo torna a risalire lentamente per opera della rete che lo sta ricaricando.

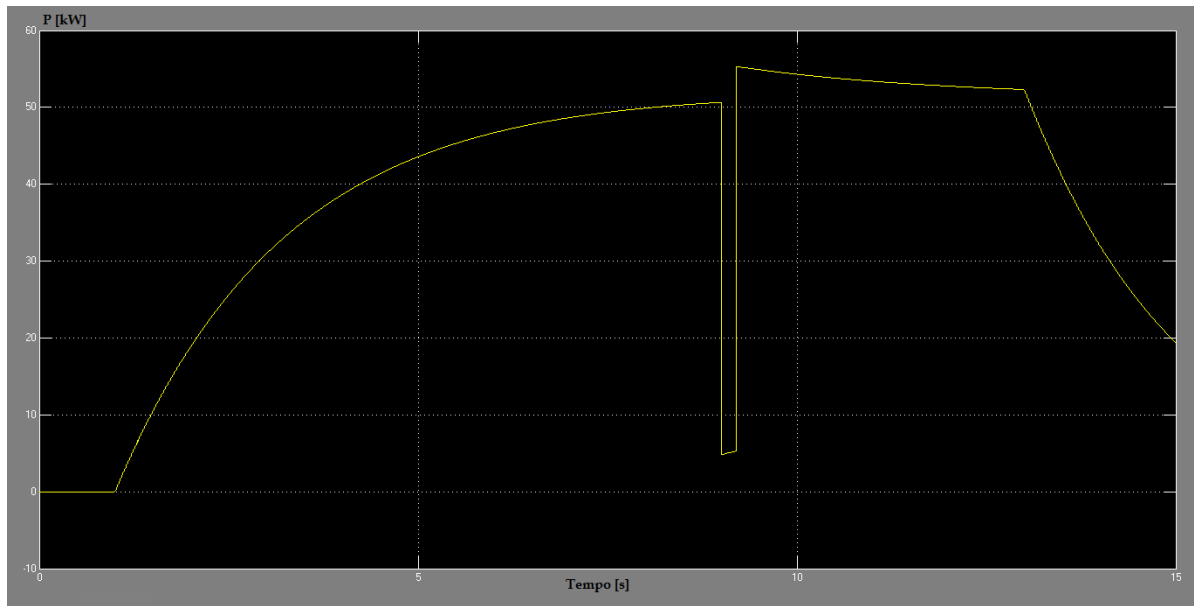


Figura 7.6: potenza erogata dalla rete

Per quanto riguarda le potenze si inizia considerando la potenza erogata dalla rete: il suo valore nell'istante in cui si verifica il buco di tensione è praticamente quello di regime.

La rete di alimentazione, a causa del buco di tensione, non riesce più a fornire la potenza che a regime fornisce al carico.

All'istante $t=9s$, come si vede in figura 7.6 la potenza prodotta dalla rete cala bruscamente per poi risalire al termine del buco di tensione.

Il valore a cui la potenza erogata dalla rete si trova dopo il buco di tensione è un po' più alto del valore precedente: questo perché la rete, dopo il buco di tensione, sta ricaricando l'accumulo.

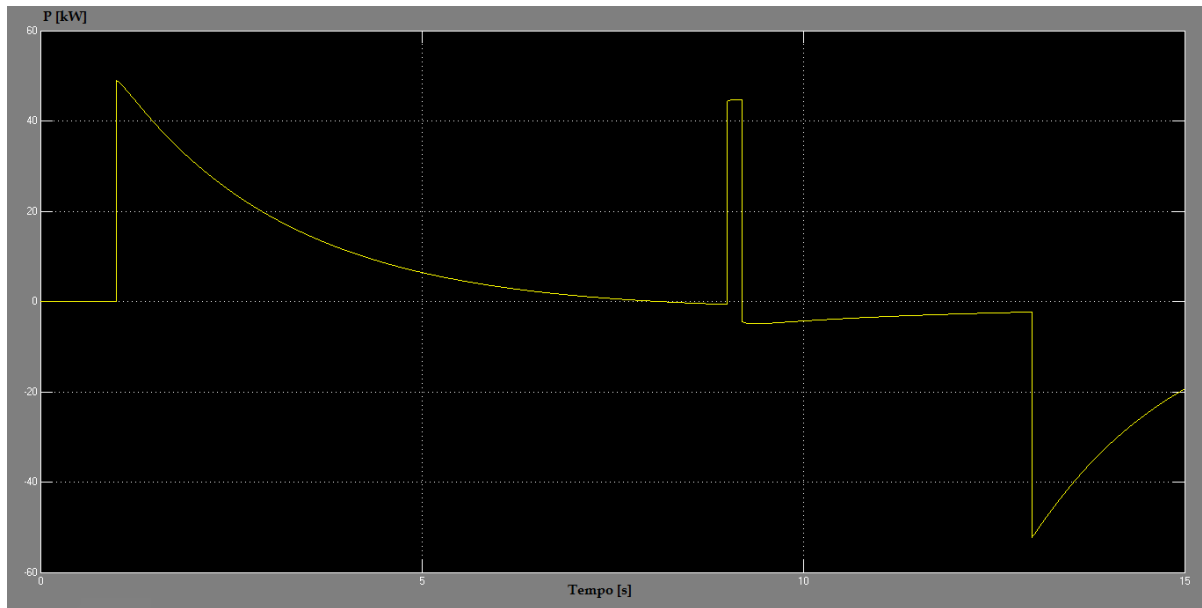


Figura 7.7: potenza erogata dall'accumulo

Dall'andamento della potenza erogata dall'accumulo si vede come esso sia fondamentale per permettere un corretto funzionamento del carico anche in presenza di buchi di tensione.

All'istante $t=9s$ infatti la potenza erogata dall'accumulo sale immediatamente a compensare quella che la rete non riesce a fornire per poi scendere subito appena il buco di tensione è terminato.

Confrontando le figure 7.6 e 7.7 si vede come la rete e l'accumulo complessivamente forniscono al carico la potenza da lui richiesta.

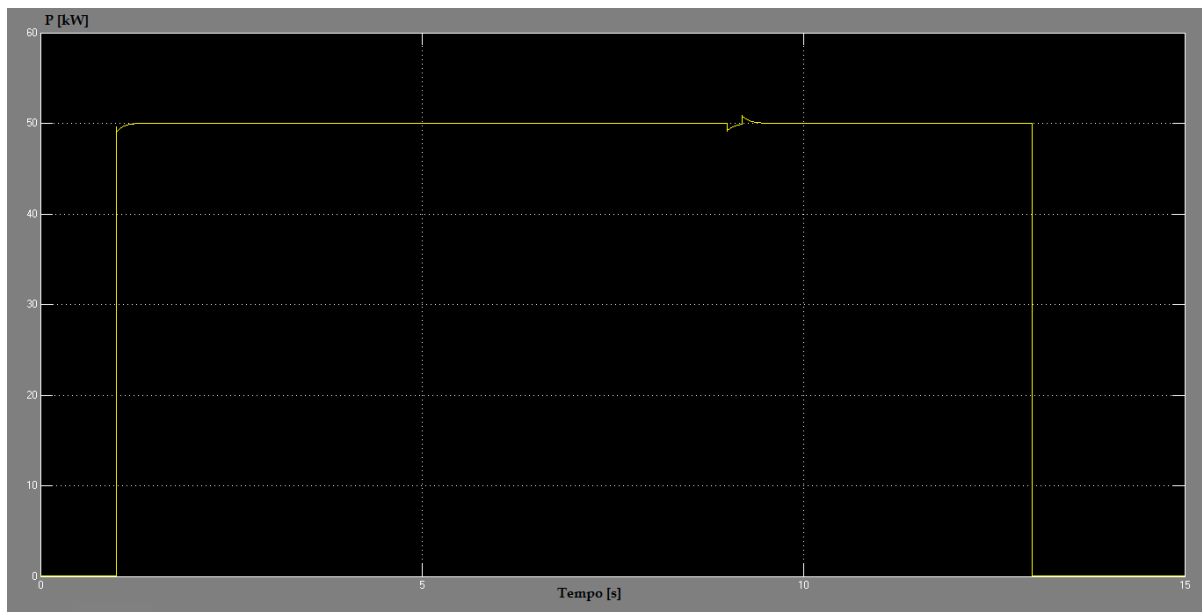


Figura 7.8: andamento della potenza assorbita dal carico D in presenza di buco di tensione

In figura 7.2 è mostrato l'andamento della potenza assorbita dal carico D in assenza di perturbazioni, confrontando tale figura con la figura 7.8 si vede l'effettivo effetto della perturbazione sulla potenza del carico.

Ricordando che il carico è a resistenza costante, un brusco calo di tensione corrisponderebbe a un brusco calo di corrente, e quindi di potenza.

Dalla figura 7.8 si vede che grazie all'accumulo questo calo di potenza è molto piccolo, infatti il suo valore è inferiore a 1kW e tende ad azzerarsi rapidamente.

La presenza di un sistema di accumulo quindi è estremamente efficace per contrastare i buchi di tensione di durata non troppo estesa, anche in questo caso dove invece che progettare un sistema apposta è stato utilizzato un accumulo progettato con altre finalità.

SIMULAZIONE 4, CASO 2: BUCO DI TENSIONE DA 1s

In questo secondo caso esaminato considereremo un buco di tensione la cui durata è aumentata rispetto al caso precedente a 1s e la cui entità è tale da ridurre l'ampiezza delle tensioni del 90% come nel caso precedente.

Poiché anche in questo caso utilizziamo il sistema di accumulo progettato per la prima simulazione la capacità resta invariata a 6F e anche i regolatori sono gli stessi del caso precedente.

I due accorgimenti presi per il caso precedente valgono anche in questo, l'unica differenza sta nel fatto che il buco di tensione (che inizia sempre nell'istante $t=9s$) questa volta termina all'istante $t=10s$.

Il buco di tensione di questo caso ha ampiezza uguale a quello del caso precedente ma ha una durata quintupla: risulta molto più gravoso e si aspetta che si verifichino delle perturbazioni molto più significative sulle varie grandezze elettriche.

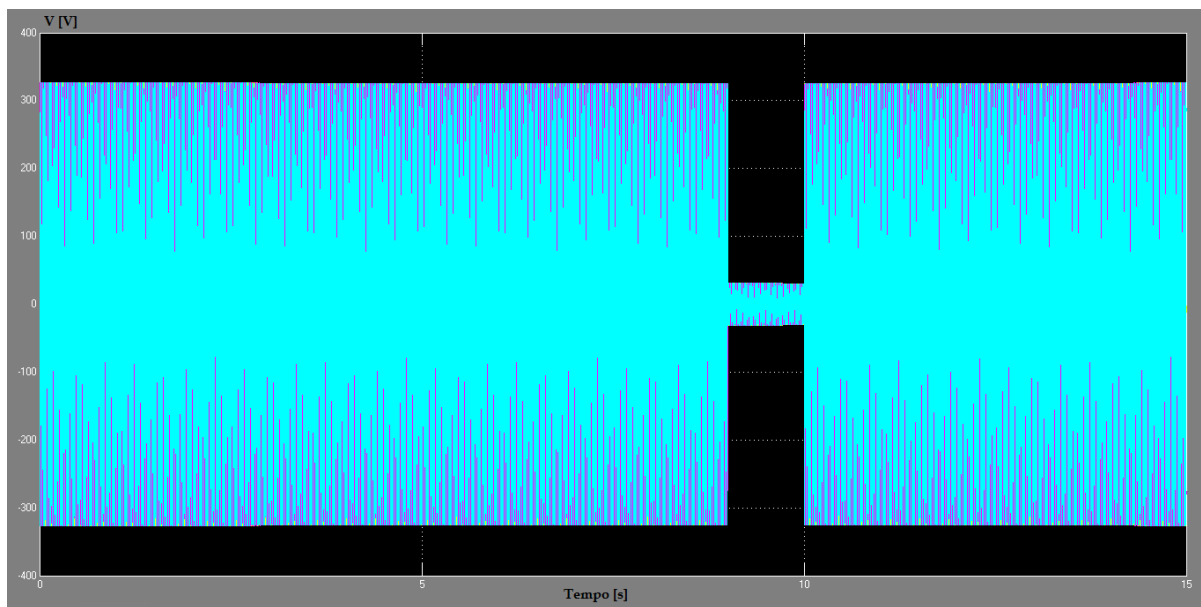


Figura 7.9: tensioni lato rete

Come prima cosa si esamina l'andamento delle tensioni sulla rete in alternata: il buco di tensione si vede chiaramente tra gli istanti $t=9s$ e $t=10s$.

Se confrontato con quello del caso precedente in figura 7.3 si osserva che la differenza risulta notevole.

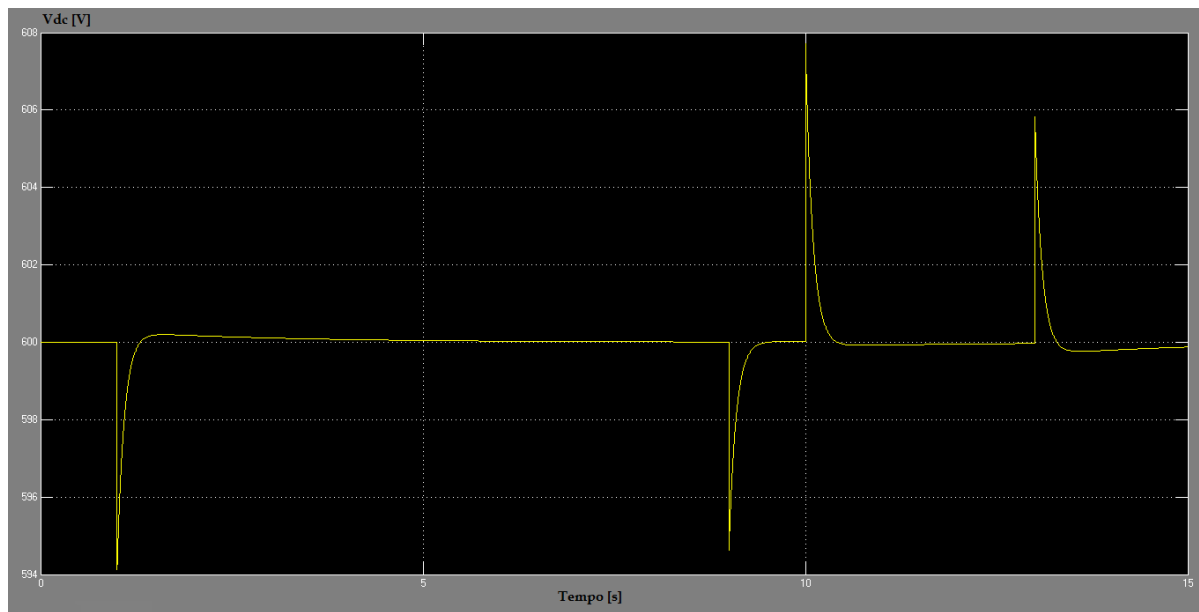


Figura 7.10: tensione lato carico

La seconda tensione visualizzata è la tensione sul carico: il buco di tensione presente sulla rete in alternata ha come effetto sul carico il doppio transitorio che parte all'istante $t=9s$ in figura 7.10.

Confrontando tale doppio transitorio con quello del caso precedente (in figura 7.4) si può vedere come il suo valore, grazie alla presenza dell'accumulo, sia anche in questo caso molto limitato e non provochi quindi particolari problemi.

La principale differenza tra questo doppio transitorio con quello del caso precedente sta nei tempi in cui si manifesta, le ampiezze dei picchi risultano invece molto simili dipendendo esse soprattutto dall'ampiezza del buco di tensione.

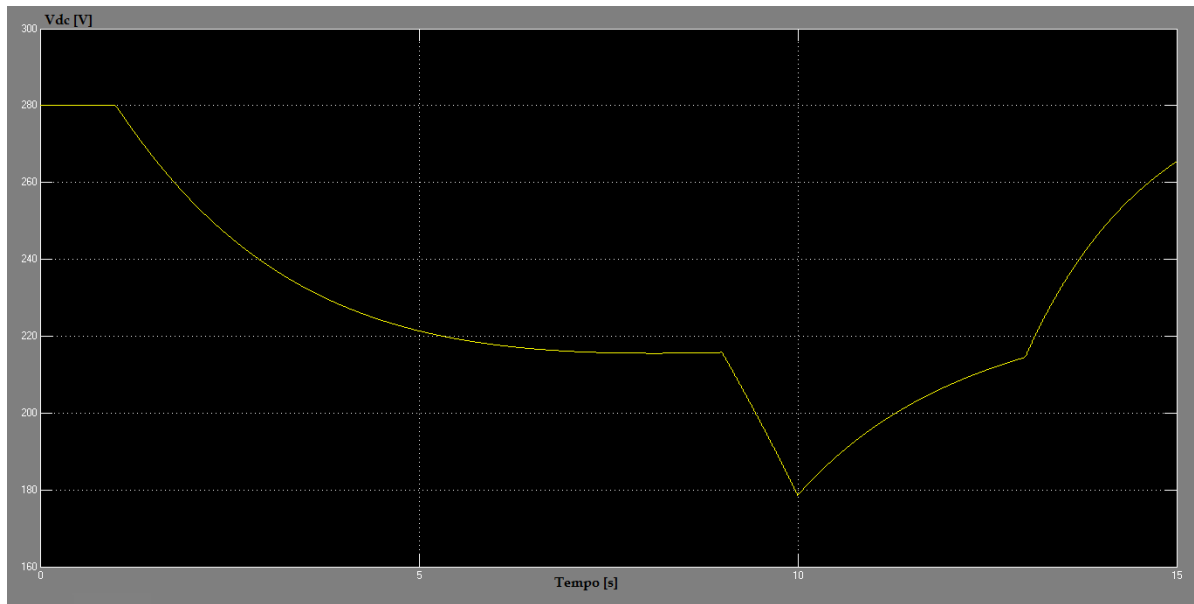


Figura 7.11: tensione lato accumulatore

L'ultima tensione esaminata è quella sull'accumulo: come precedentemente accennato il modello non è esattamente a regime e questo fatto si vede chiaramente dall'andamento della tensione sull'accumulo in figura 7.11.

Nonostante questo inconveniente il comportamento della tensione sull'accumulo in caso di buco di tensione risulta chiaro esaminando l'andamento tra i 9s e i 13s della simulazione.

Appena il buco di tensione si verifica l'accumulo interviene e di conseguenza la sua tensione scende rapidamente, in questo caso in particolare scende di circa 35V.

Quando il buco di tensione termina la tensione sull'accumulo torna a risalire lentamente per opera della rete che lo sta ricaricando.

Confrontando questo andamento della tensione sull'accumulo con quello del caso precedente in figura 7.5 si vede come in questo caso il calo di tensione in corrispondenza del buco di tensione sia molto maggiore.

Il motivo dell'aumento così significativo del calo di tensione è ovviamente la maggiore energia richiesta all'accumulo per compensare il buco di tensione.

Considerando che con la capacità utilizzata ho un calo abbastanza lineare di circa 35V per ogni secondo di durata del buco di tensione (con ampiezza delle tensioni ridotta del 90%), posso stimare che questo sistema di accumulatore così progettato, considerando la tensione iniziale di 240V, sarebbe in grado di compensare un buco di tensione della durata massima di circa due secondi e mezzo.

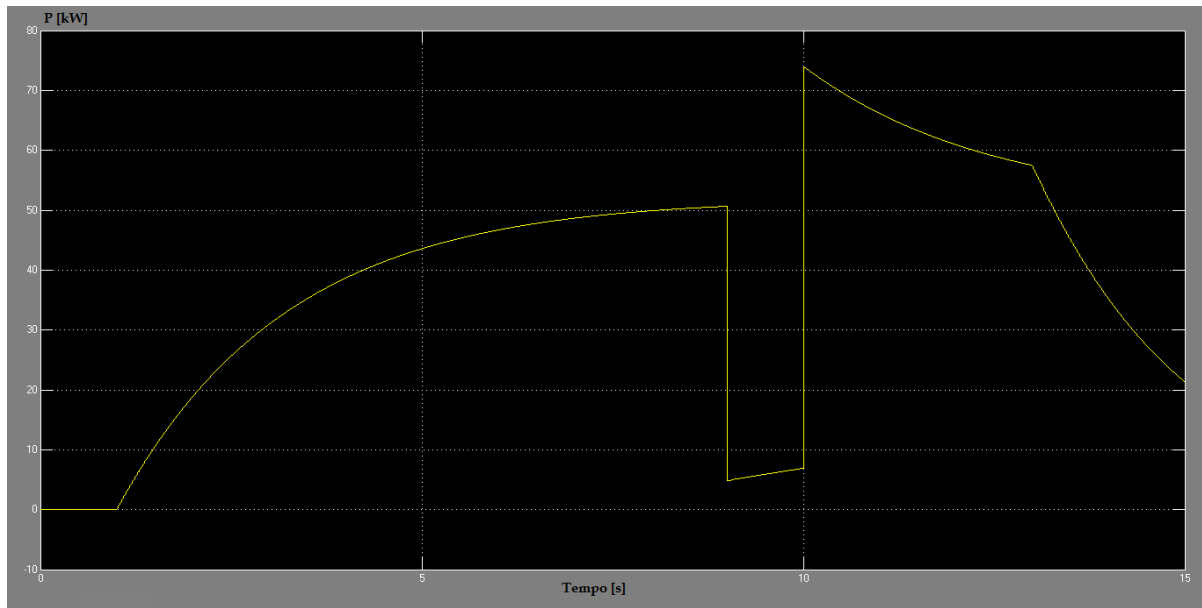


Figura 7.12: potenza erogata dalla rete

Per quanto riguarda le potenze si inizia considerando la potenza erogata dalla rete: il suo valore nell'istante in cui si verifica il buco di tensione è praticamente quello di regime.

La rete di alimentazione, a causa del buco di tensione, non riesce più a fornire la potenza che a regime fornisce al carico.

All'istante $t=9s$, come si vede in figura 7.12 la potenza prodotta dalla rete cala bruscamente per poi risalire al termine del buco di tensione.

Il valore a cui la potenza erogata dalla rete si trova dopo il buco di tensione è, rispetto al caso precedente (vedi figura 7.6) significativamente più alto del valore precedente: questo perché la rete, dopo il buco di tensione, sta ricaricando l'accumulo.

La tensione dell'accumulo, trovandosi al termine del buco di tensione ad un valore inferiore a quello che aveva nel caso precedente, richiede questa volta alla rete un maggior contributo per la ricarica.

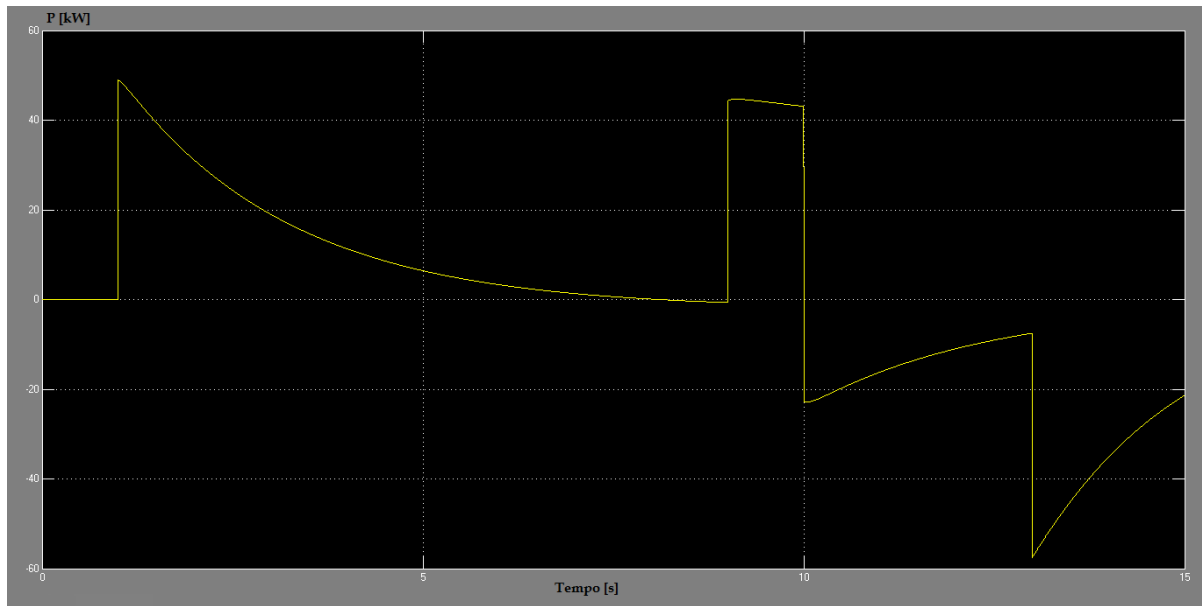


Figura 7.13: potenza erogata dall'accumulo

Dall'andamento della potenza erogata dall'accumulo si vede come esso sia fondamentale per permettere un corretto funzionamento del carico anche in presenza di buchi di tensione.

All'istante $t=9s$ infatti la potenza erogata dall'accumulo sale immediatamente a compensare quella che la rete non riesce a fornire per poi scendere dopo un secondo appena il buco di tensione è terminato.

Confrontando le figure 7.12 e 7.13 si vede come la rete e l'accumulo complessivamente forniscono al carico la potenza da lui richiesta.

Confrontando le figure 7.7 e 7.13 si vede invece come l'accumulo fornisca in questo caso un contributo in termini di energia decisamente più elevato rispetto al caso precedente.

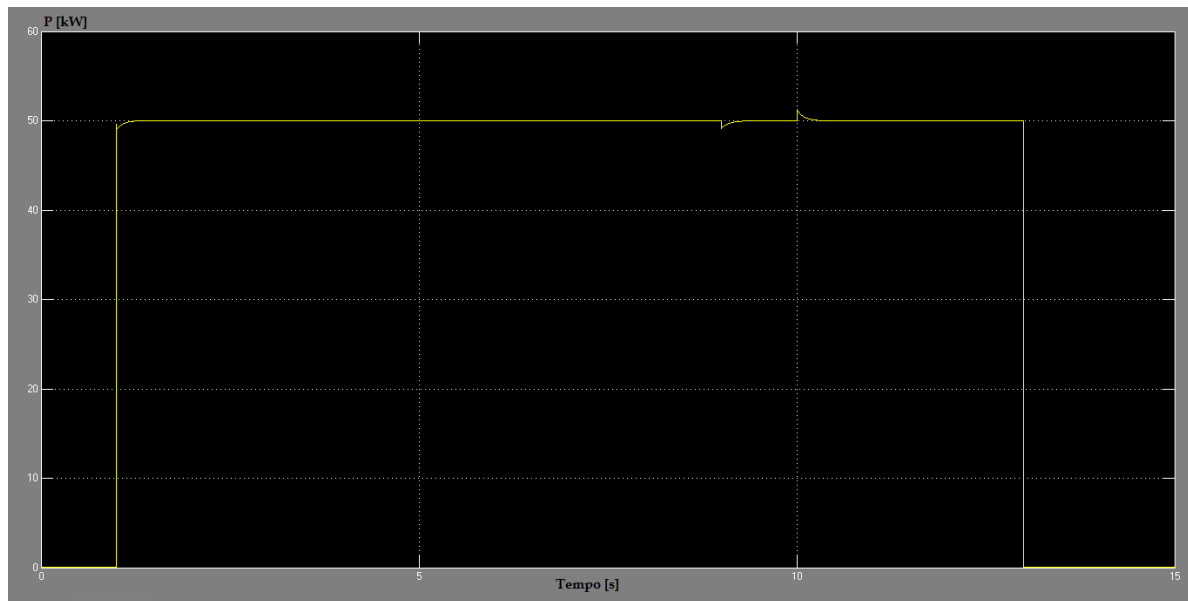


Figura 7.14: andamento della potenza assorbita dal carico D in presenza di buco di tensione

In figura 7.2 è mostrato l'andamento della potenza assorbita dal carico D in assenza di perturbazioni, confrontando tale figura con la figura 7.14 si vede l'effettivo effetto della perturbazione sulla potenza del carico.

Ricordando che il carico è a resistenza costante, un brusco calo di tensione corrisponderebbe a un brusco calo di corrente, e quindi di potenza.

Dalla figura 7.14 si vede che grazie all'accumulo questo calo di potenza è molto piccolo, infatti il suo valore è inferiore a 1kW e tende ad azzerarsi rapidamente.

La presenza di un sistema di accumulo quindi è estremamente efficace per contrastare i buchi di tensione di durata non troppo estesa, anche in questo caso dove invece che progettare un sistema apposta è stato utilizzato un accumulo progettato con altre finalità.

Inoltre confrontando la figura 7.14 con la figura 7.8 si vede che l'entità delle perturbazioni sulla potenza del carico non aumenta in modo visibile all'aumentare della durata del buco di tensione.

Ovviamente questo discorso non varrebbe se la durata del buco di tensione sarebbe tale da scaricare completamente l'accumulo.

CONCLUSIONI:

I risultati ottenuti dalle simulazioni

I risultati ottenuti dalle simulazioni nei vari casi di studio presi in esame mostrano come le reti di distribuzione possano trarre grande beneficio dall'impiego dei sistemi di accumulo.

I sistemi di accumulo sono infatti utilizzabili efficacemente nelle reti di distribuzione per le applicazioni più svariate tra cui, come visto nelle simulazioni, il peak shaving, il recupero dell'energia che verrebbe altrimenti sprecata e la limitazione dei disturbi e dei malfunzionamenti che causano variazioni indesiderate sulle varie grandezze elettriche.

Parallelamente al più semplice impiego dei sistemi di accumulo una rete di distribuzione realizzata in continua invece che in alternata offre anche altri vantaggi importanti, ad esempio la maggior sicurezza per le persone, la maggior facilità di regolazione della potenza e le minori perdite a parità di potenza impiegata.

Nella prima simulazione è stato visto il beneficio che un sistema di accumulo può dare effettuando il peak shaving su carichi che richiedono tanta potenza per un tempo breve: un sistema di accumulo può compensare i picchi più alti e ricaricarsi nei momenti in cui la richiesta di potenza da parte del carico è inferiore.

Il beneficio di questo impiego dei sistemi di accumulo è evidente dal punto di vista soprattutto economico: un assorbimento di potenza più costante costa meno di un assorbimento di potenza più variabile a parità di energia assorbita.

Nella seconda simulazione è stato visto il beneficio che un sistema di accumulo può dare effettuando il recupero di energia in quei carichi che sono caratterizzati da cicli di lavoro con frenature: un sistema di accumulo può assorbire l'energia che verrebbe altrimenti dissipata e restituirla durante il periodo di assorbimento successivo.

Il beneficio di questo impiego dei sistemi di accumulo è evidente sempre dal punto di vista economico ma anche dal punto di vista dell'efficienza: un sistema di

accumulo che recuperi l'energia che verrebbe altrimenti dissipata per poi riutilizzarla evita sprechi inutili e permette di richiederne meno alla rete.

Nella terza simulazione è stato visto il beneficio che un sistema di accumulo può dare se collegato in presenza di un carico che genera disturbi: un sistema di accumulo può funzionare da filtro e ridurre i disturbi generati dal carico.

Il beneficio di questo impiego dei sistemi di accumulo è evidente soprattutto dal punto di vista della qualità: la presenza di flicker o di armoniche in rete è infatti dannosa e può causare problemi ai carichi più sensibili.

Nella quarta e ultima simulazione è stato visto il beneficio che un sistema di accumulo può dare se utilizzato come protezione contro i disturbi e i malfunzionamenti della rete di distribuzione: un sistema di accumulo può compensare buchi di tensione e altri fenomeni che potrebbero compromettere il buon funzionamento dei carichi.

Il beneficio di questo impiego dei sistemi di accumulo è evidente soprattutto dal punto di vista della qualità: una buona alimentazione deve essere infatti soggetta al minor numero e alla minore intensità possibile di perturbazioni.

Tutti questi vantaggi offerti dall'impiego dei sistemi di accumulo e dall'impiego delle reti di distribuzione in continua insieme alla riduzione dei costi ad essi associati, grazie alle sempre più avanzate tecnologie, mostrano in ottica futura quella che potrebbe essere un'alternativa molto valida alle attuali reti di distribuzione in alternata.

APPENDICE:

Lo schema in Simulink

In appendice l'obiettivo è mostrare nei dettagli la struttura e il funzionamento dello schema realizzato in Simulink al fine di questa tesi.

Lo schema è oltre, che concettualmente, anche strutturalmente diviso in 5 parti, come mostrato precedentemente in figura 2.2.

Le parti che compongono lo schema completo sono:

- Schema della rete in continua
- Schema dell'accumulo
- Regolatore dell'accumulo
- Regolatore della rete (in alternata)
- Schema della rete in alternata

In più c'è il blocchetto "Powergui" che serve ad impostare il tipo di simulazione e non può essere considerato compreso in nessuna delle parti dello schema appena menzionate.

IL BLOCCHETTO POWERGUI

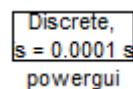


Figura 8.1: il blocchetto Powergui

Il blocchetto "Powergui" è un componente fondamentale per la simulazione del circuito: senza di esso non è infatti possibile utilizzare i blocchi della sezione

“SimPowerSystems” cioè generatori, carichi e tutto ciò che fa parte della rete di potenza.

Il blocco “Powergui” ha anche altre funzioni importanti come quella di stabilire il tipo di simulazione.

Si è scelto un tipo discreto con tempo di campionamento pari a 0,1ms, ovviamente più piccolo è questo tempo più precisa ma anche più lenta sarà la simulazione.

LO SCHEMA DELLA RETE IN CONTINUA

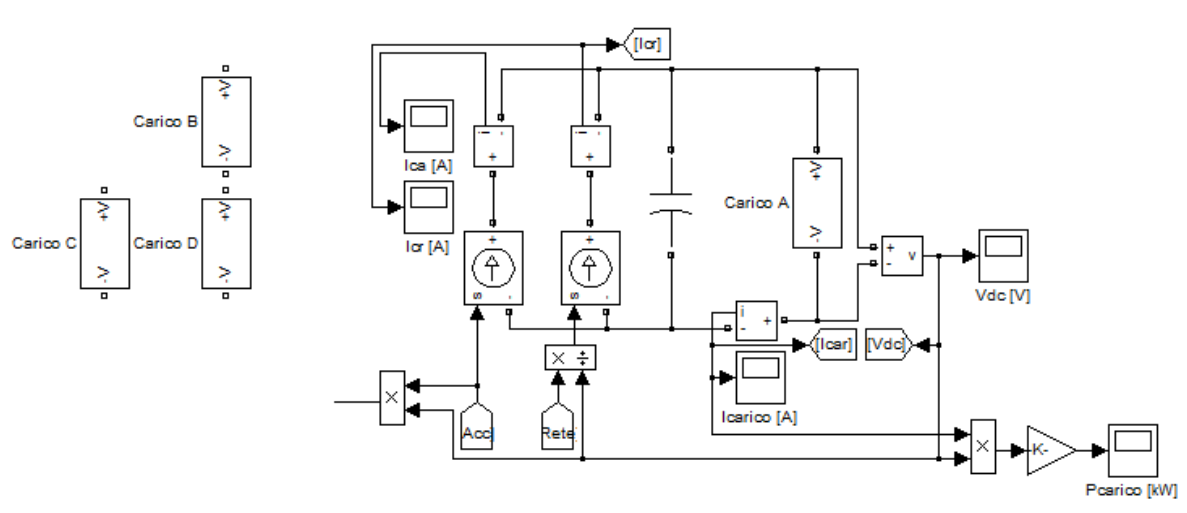


Figura 8.2: schema della rete in continua

Questa sezione dello schema è il modello della rete in continua a 600V.

In figura 2.3 è possibile vedere il corrispondente schema concettuale con la relativa spiegazione che verrà comunque qui ripresa.

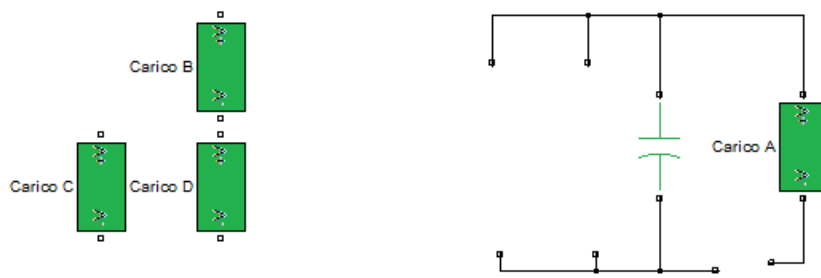


Figura 8.3: carichi e condensatore

I carichi e il condensatore: i carichi utilizzati sono quattro e sono etichettati come “Carico A, B, C o D”.

Questi carichi sono, nello schema della rete in continua, costituiti da dei sottosistemi la cui modellizzazione interna è discussa all’inizio delle corrispondenti simulazioni.

In ogni simulazione, ovviamente, c’è un carico solo collegato alla rete mentre gli altri tre vengono lasciati scollegati.

La rete in continua, a regime, è progettata per funzionare con una potenza 50kW e ha una tensione nominale di 600V.

Il condensatore che serve per il livellamento della tensione dopo l’invertitore è già carico a 600V e ha un valore di 1mF.

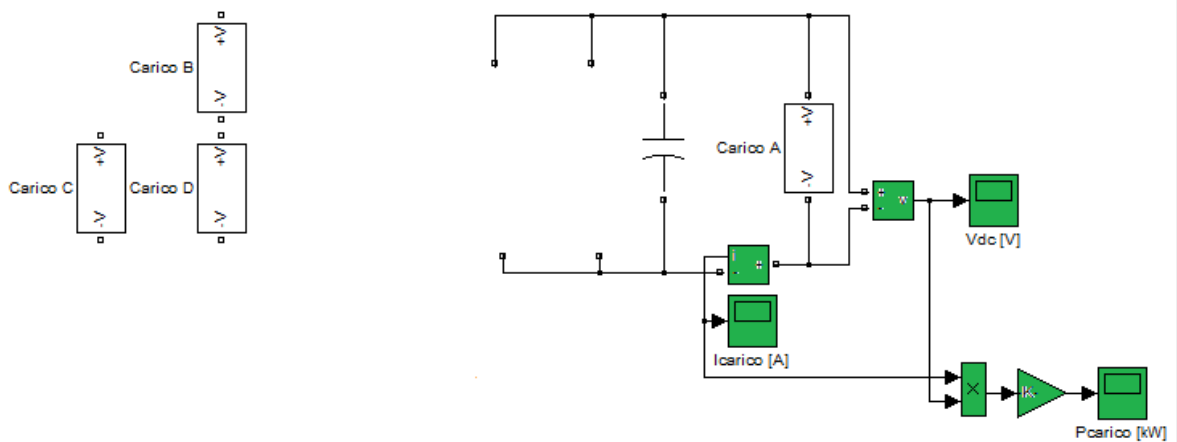


Figura 8.4: misure sul carico

Le misure sul carico: ci sono un voltmetro e un amperometro sul carico che permettono la misura della corrispondente tensione e corrente.

Le grandezze che si desidera visualizzare vengono inviate nei blocchetti "scope", ossia i blocchetti che tracciano i grafici riportati nei capitoli delle simulazioni.

Tensione e corrente del carico, inoltre, vengono utilizzate per calcolare la potenza del carico: vengono prima moltiplicate tra loro, il blocchetto di guadagno converte i W in kW e la potenza del carico così trovata viene visualizzata anche essa nel relativo blocchetto "scope".

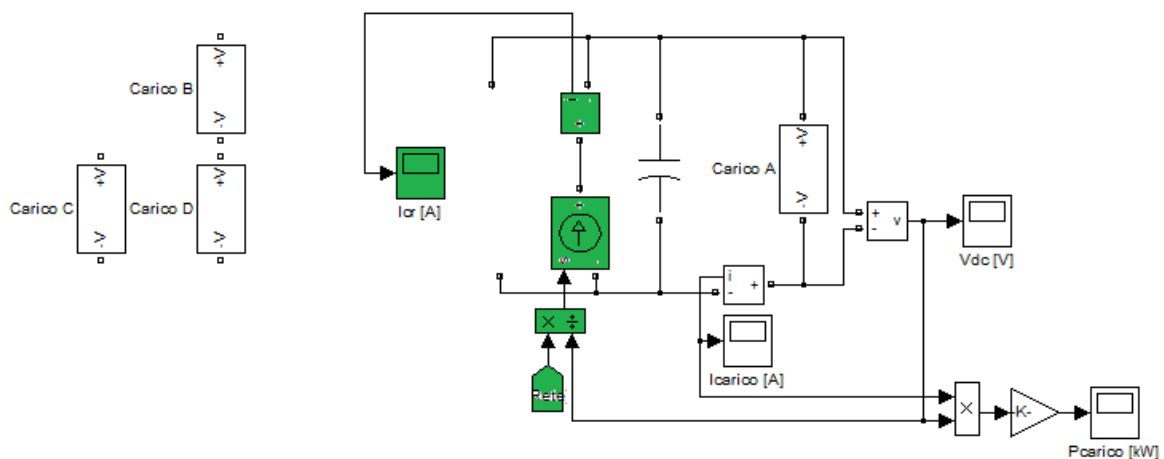


Figura 8.5: contributo della rete

Il contributo della rete: volendo considerare per semplicità il raddrizzatore come ideale, senza perdite di commutazione, fluttuazioni di tensione dovute alle valvole o altri fenomeni simili rappresentiamo il contributo della rete come un generatore ideale di corrente pilotato.

Per regolare questo generatore divido la potenza fornita dalla rete di alimentazione in alternata (che verrà successivamente discussa nelle altre parti dello schema) per la tensione lato continua.

La tensione lato continua viene presa dalla misura relativa, mentre la potenza fornita dalla rete di alimentazione in alternata proviene da un'altra parte della rete.

Per riportare grandezze da un punto all'altro dello schema si utilizzano due blocchetti: il blocchetto "goto" e il blocchetto "from": il blocchetto "goto" preleva la grandezza desiderata e il blocchetto "from" corrispondente (che può anche essere più di uno) la riporta nel punto desiderato.

In figura 8.5 è quindi presente un blocchetto "from" che fornisce come informazione il valore della potenza fornita dalla rete di alimentazione in alternata.

Infine la corrente erogata dal generatore viene misurata da un amperometro e visualizzata nel blocchetto "scope" chiamato "Icr", questa misura è utile per vedere quanta corrente del carico è fornita dalla rete.

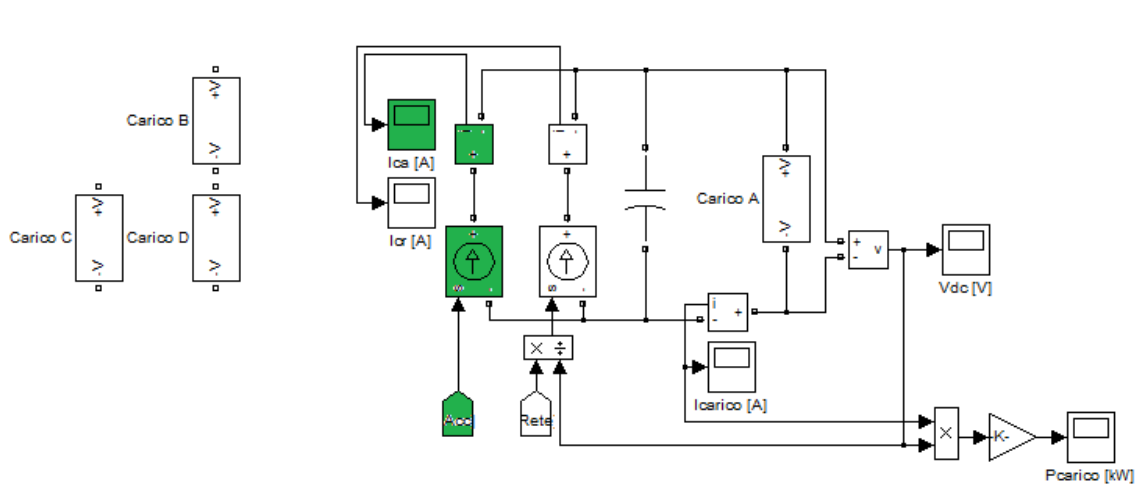


Figura 8.6: contributo dell'accumulo

Il contributo dell'accumulo: anche in questo caso rappresentiamo come ideale il convertitore d.c./d.c. tra accumulo e carico utilizzando un altro generatore ideale di corrente pilotato.

In questo caso a comandare il generatore è direttamente una corrente che arriva da un altro blocchetto "from": l'origine di tale corrente verrà discussa nelle parti successive.

Proprio come nel caso del generatore della rete anche a questo viene applicato un amperometro con relativo blocchetto "scope" per visualizzare la parte di corrente del carico da esso fornita.

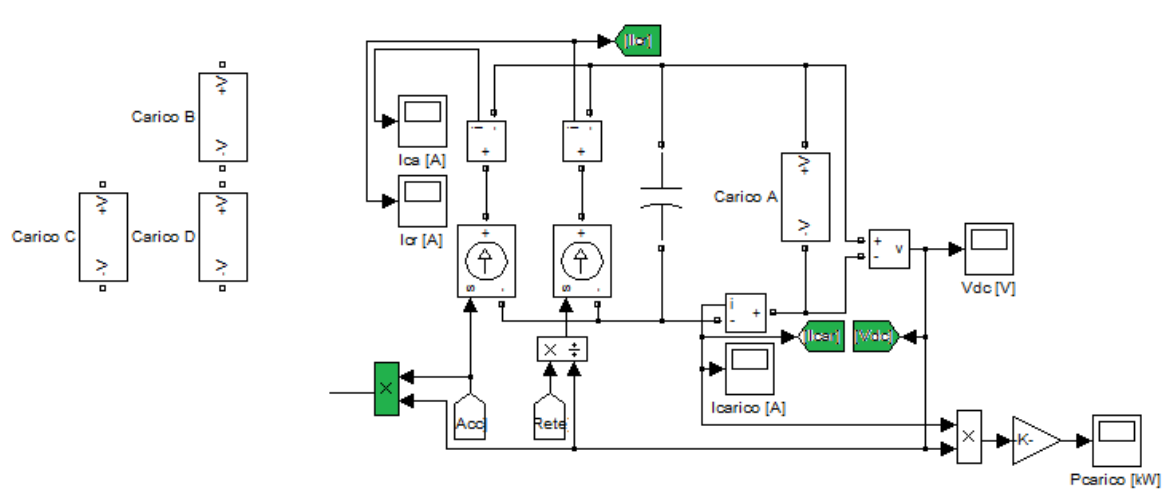


Figura 8.7: collegamenti esterni

I collegamenti esterni: sono i restanti blocchetti cioè 3 blocchetti "goto" e un collegamento diretto.

I blocchetti "goto" prendono come informazioni rispettivamente la tensione del carico, la corrente del carico e la parte di corrente del carico data dalla rete.

Il collegamento diretto è ottenuto dal prodotto della tensione sul carico per la parte di corrente del carico data dall'accumulo, cioè è la potenza fornita dall'accumulo.

Non c'è alcuna differenza pratica tra i blocchetti "goto" e i collegamenti diretti: i blocchetti "goto" permettono però di rendere il modello più chiaro e separare le varie parti.

L'utilità di questi collegamenti esterni si vedrà ovviamente nelle altre parti del modello.

LO SCHEMA DELL'ACCUMULO

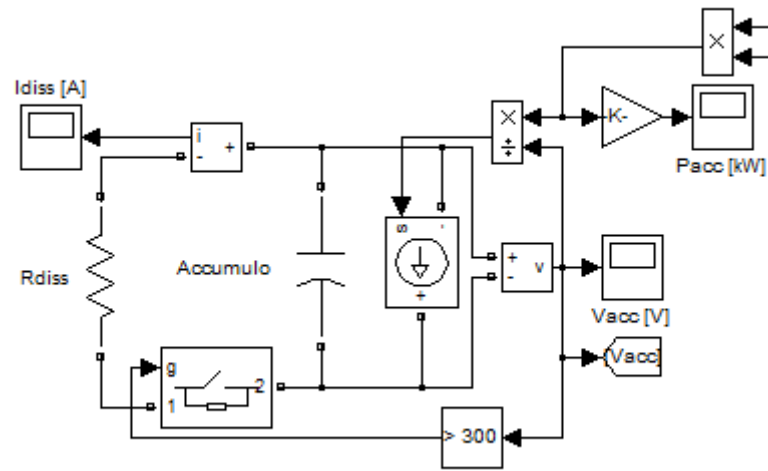


Figura 8.8: schema dell'accumulo

Questa sezione dello schema è il modello dell'accumulo e della rete in continua a 240V.

In figura 2.4 è possibile vedere il corrispondente schema concettuale con la relativa spiegazione che verrà comunque qui ripresa.

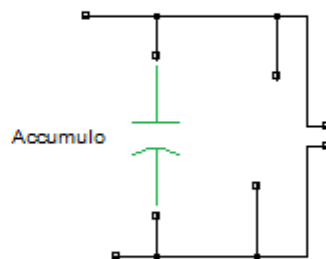


Figura 8.9: capacità dell'accumulo

La capacità dell'accumulo: rappresenta l'insieme di supercondensatori che servono da accumulo

L'accumulo, come visto precedentemente, lavora con una tensione media di 240V che può variare raggiungendo i valori limiti di 150V come tensione minima e 300V come tensione massima.

I motivi della scelta di questi tre valori di tensione sono discussi nel capitolo 2.

La capacità dell'accumulo viene impostata già carica al suo valore di tensione media, cioè a 240V.

Il valore della capacità dell'accumulo non è fisso ma dipende dal tipo di carico che si desidera alimentare, per questo motivo il calcolo della capacità dell'accumulo è trattato all'inizio di ogni simulazione.

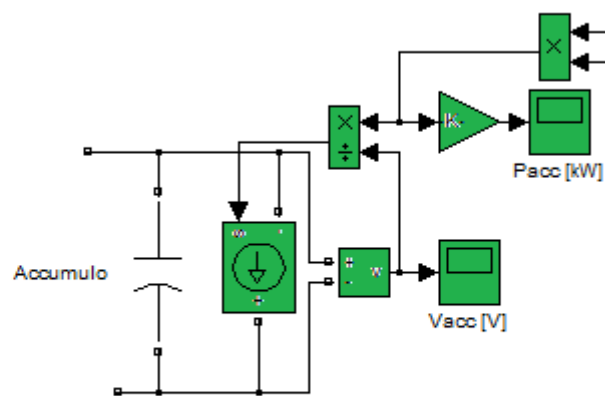


Figura 8.10: controllo e misure

Il controllo e le misure: l'energia nell'accumulo viene variata tramite un generatore pilotato di corrente messo in parallelo alla capacità.

Il generatore pilotato di corrente rappresenta il lato 240V del convertitore d.c./d.c. e scarica o ricarica l'accumulo generando una corrente che ha l'ampiezza in funzione dell'energia trasferita.

La potenza che deve trasferire il convertitore d.c./d.c. tra l'accumulo la rete in continua a 600V arriva dal blocchetto moltiplicatore (in alto a destra in figura 8.10)

che è lo stesso presente nella parte del modello della rete in continua a 600V che realizzava il collegamento esterno (in basso a sinistra in figura 8.7).

Tale potenza viene visualizzata in un blocchetto "scope" dopo essere passata attraverso un blocchetto di guadagno che converte i W in kW.

Una ulteriore grandezza qui visualizzata è la tensione sull'accumulo che viene misurata con un voltmetro e inviata al proprio blocchetto "scope".

La potenza dell'accumulo viene divisa per questa tensione in modo da dare la corrente che pilota il generatore.

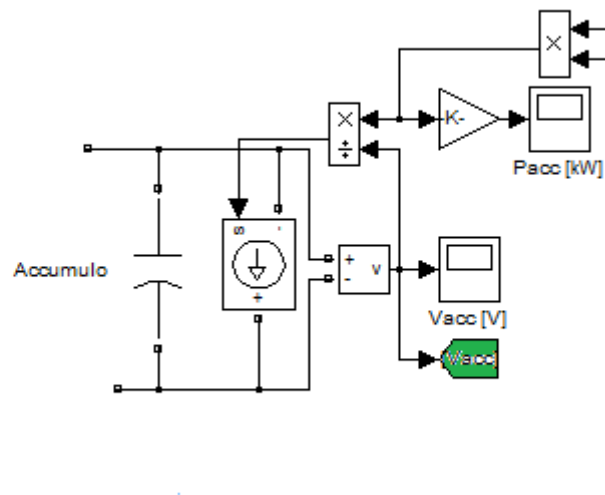


Figura 8.11: collegamenti esterni

I collegamenti esterni: l'unico collegamento esterno, in questa parte dello schema, è la tensione sull'accumulo, che viene prelevata attraverso un blocchetto "goto".

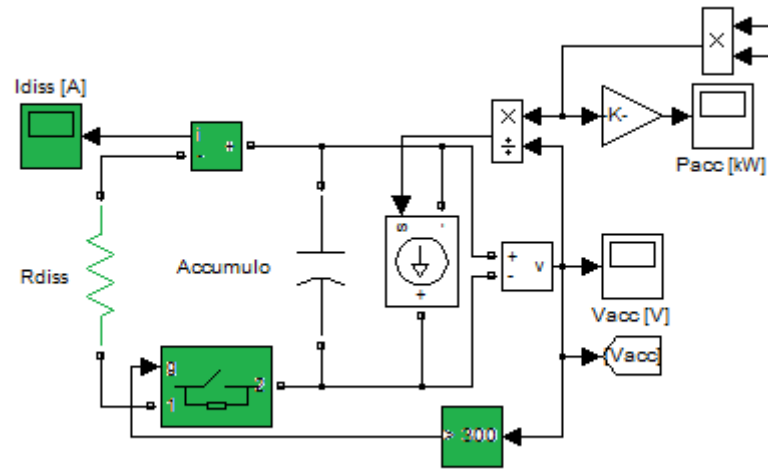


Figura 8.12: limitatore di tensione massima

Il limitatore di tensione massima: come anticipato nel capitolo 2, mentre il limitatore di tensione minima verrà collocato nei regolatori, il limitatore di tensione massima viene posto direttamente sull'accumulo.

Esso è costituito da un interruttore con una piccola resistenza in serie collegati in parallelo all'accumulo.

Mentre l'accumulo potrebbe "rifiutarsi" di fornire energia quando è eccessivamente scarico, deve assolutamente assorbita quando richiesto anche se è già carico al massimo visto che il convertitore della rete è unidirezionale.

Dal momento che non si può sovraccaricare l'accumulo a più di 300V, se venisse richiesto un ulteriore immagazzinamento di energia il blocchetto comparatore, che riceve in ingresso la tensione del carico, aprirebbe l'interruttore e l'energia in eccesso si dissiperebbe tutta sulla resistenza posta in parallelo alla capacità dell'accumulo.

Quando la tensione è tornata sotto i 300V l'interruttore si riapre e la dissipazione ha termine.

L'intervento di questo limitatore rappresenta uno spreco di energia, cosa che si vorrebbe evitare: il superamento dei 300V rappresenta però una condizione di emergenza e nel normale funzionamento ciò non accade mai.

La resistenza utilizzata per la dissipazione deve avere un valore piccolo dovendo dissipare in fretta l'energia in eccesso.

La corrente dissipata viene misurata con un amperometro e viene visualizzata nel relativo blocchetto "scope".

IL REGOLATORE DELL'ACCUMULO

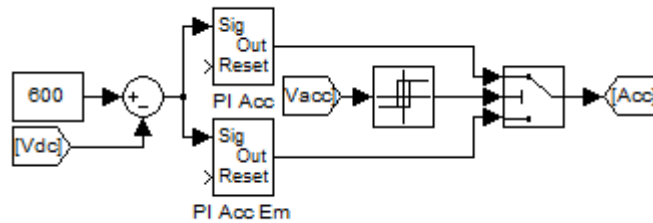


Figura 8.13: regolatore dell'accumulo

Questa sezione dello schema è il regolatore dell'accumulo, il suo scopo è stabilire quanta potenza l'accumulo deve erogare o assorbire in ogni istante di tempo.

In figura 2.5 è possibile vedere il corrispondente schema concettuale con la relativa spiegazione che verrà comunque qui ripresa.

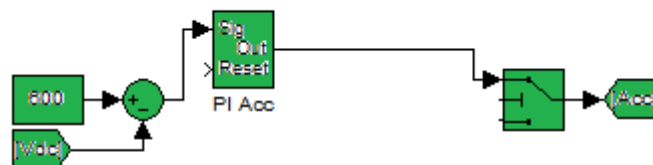


Figura 8.14: regolatore base

Il regolatore base: si utilizza un regolatore di tipo proporzionale integrale, etichettato come "PI Acc" in figura 8.14.

Il regolatore dell'accumulo ha lo scopo di regolare il trasferimento di energia tra l'accumulo e la rete in continua a 600V in modo da mantenere la tensione sul carico a 600V, limitando le perturbazioni sia in ampiezza, sia come durata.

Il regolatore di tipo PI tende ad azzerare il suo ingresso e, poiché si vuole agire sulla tensione del carico, si collega in ingresso al regolatore la differenza tra il valore numerico 600 e la tensione misurata sul carico.

La tensione misurata sul carico arriva dal blocchetto "from" in figura 8.14 e il rispettivo blocchetto "goto" si può vedere evidenziato in figura 8.7.

Il valore numerico 600 invece è ottenuto tramite il semplice impiego di una costante.

Il regolatore agirà quindi in modo da azzerare il proprio ingresso, cioè cercando di annullare la differenza tra il valore di tensione sul carico e il valore desiderato (cioè 600), variando la propria uscita.

I valori K_p e K_i del regolatore PI, che sono rispettivamente le costanti relative alla parte proporzionale e a quella integrale, sono discussi in ogni simulazione: è proprio da tali valori che dipende l'ampiezza delle perturbazioni e la velocità con cui vengono eliminate.

In uscita al regolatore PI c'è un blocchetto "switch", che in condizioni normali non fa nulla, e successivamente un blocchetto "goto".

L'uscita del regolatore si ricollega infine, attraverso il blocchetto "from" in figura 8.6, all'ingresso del generatore pilotato di corrente che eroga (o assorbe) la corrente in arrivo dall'accumulo.

L'uscita del regolatore PI dell'accumulo è quindi di fatto la corrente che arriva al carico per opera dell'accumulo.

Anche se non per via diretta, il regolatore dell'accumulo è responsabile del pilotaggio anche del generatore pilotato di corrente nella parte dello schema dell'accumulo (in figura 8.10).

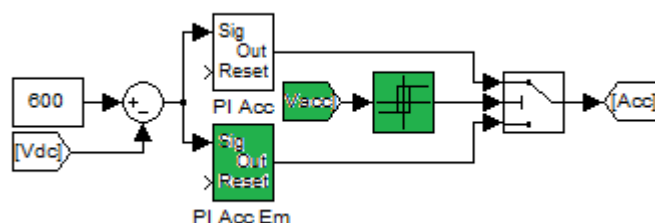


Figura 8.15: limitatore di tensione minima

Il limitatore di tensione minima: questo limitatore agisce sia sul regolatore dell'accumulo che su quello della rete, il suo compito è quello di limitare la tensione dell'accumulo a un minimo di 150V.

Questo limite di tensione minimo è meno stringente di quello di tensione massima visto che non si rischia di danneggiare componenti della rete e non è quindi netto come l'altro.

La parte di limitatore sul regolatore dell'accumulo consiste nella sostituzione del regolatore PI del normale funzionamento con uno diverso di emergenza.

Il regolatore PI di emergenza è molto più lento del regolatore utilizzato durante il normale funzionamento, ha infatti un K_p con lo stesso valore ma un K_i di valore decisamente inferiore.

In particolare si assegna al valore K_i del regolatore di emergenza il valore del K_i del regolatore del normale funzionamento diviso per 100.

Il regolatore PI di emergenza viene inserito facendo commutare il blocchetto "switch" precedentemente accennato.

Il controllo del blocchetto "switch" è ovviamente basato sul valore della tensione dell'accumulo.

Tale tensione arriva tramite un blocchetto "from" e passa per un blocchetto a isteresi: quando la tensione dell'accumulo scende sotto i 154V il blocchetto "switch" scatta sostituendo il regolatore standard con quello di emergenza.

Il blocchetto "switch" ritorna alla sua posizione standard quando la tensione dell'accumulo è risalita ad almeno 156V.

Come si può notare la soglia di intervento del limitatore è a 154V invece che a 150V: questo perché, come detto prima, questo limitatore non è netto e si vuole lasciare un margine per permettere alla tensione dell'accumulo di rallentare e ricrescere invece che arrestarla bruscamente.

IL REGOLATORE DELLA RETE

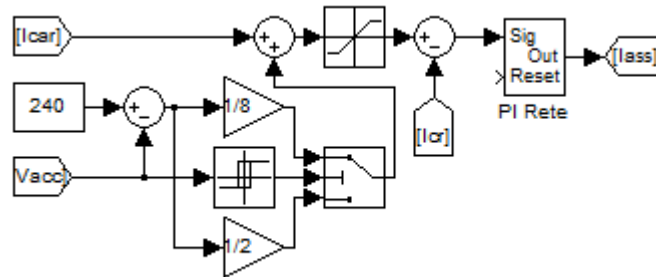


Figura 8.16: regolatore della rete

Questa sezione dello schema è il regolatore della rete, il suo scopo è stabilire quanta potenza la rete di alimentazione deve erogare in ogni istante di tempo.

In figura 2.6 è possibile vedere il corrispondente schema concettuale con la relativa spiegazione che verrà comunque qui ripresa.

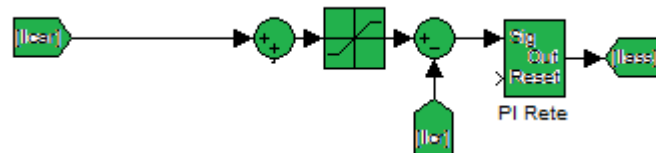


Figura 8.17: regolatore base

Il regolatore base: si utilizza anche in questo caso un regolatore di tipo proporzionale integrale, etichettato come "PI Rete" in figura 8.17.

Contrariamente al regolatore dell'accumulo, il regolatore della rete ha lo scopo di trasferire energia tra rete e carico non in modo da mantenere la tensione sul carico a 600V, ma in modo da inseguire la corrente richiesta dal carico.

Il regolatore di tipo PI tende ad azzerare il suo ingresso e, poiché si vuole agire sulla corrente trasferita al carico, si collega in ingresso al regolatore la differenza tra la corrente del carico e la sua parte fornita dalla rete.

La corrente del carico e la sua parte fornita dalla rete arrivano entrambe attraverso blocchetti "from" i cui corrispondenti blocchetti "goto" si trovano entrambi in figura 8.7.

Il regolatore agirà quindi in modo da azzerare il proprio ingresso, cioè cercando di annullare la differenza tra il valore di corrente del carico e il e il valore della parte di essa in arrivo dalla rete di alimentazione, variando la propria uscita.

I valori K_p e K_i del regolatore PI, che sono rispettivamente le costanti relative alla parte proporzionale e a quella integrale, sono discussi in ogni simulazione: è proprio da tali valori che dipende l'ampiezza delle perturbazioni e la velocità con cui vengono eliminate.

A valle del blocchetto "from" che porta la corrente del carico c'è anche un blocchetto di saturazione che ha un limite inferiore pari a zero e un limite superiore pari a infinito: questa limitazione impedisce che vengano richieste alla rete correnti negative, cioè che si chieda alla rete di assorbire invece che erogare energia, cosa che per scelta non si vuole che faccia.

Un carico che eroghi energia, ad esempio in frenatura, mostrerà dunque al regolatore della rete una corrente pari a zero e tutta l'energia erogata verrà quindi immagazzinata nell'accumulo.

In uscita al regolatore della rete è presente un blocchetto "goto" il cui corrispondente blocchetto "from" si trova nella parte dello schema della rete.

L'uscita del regolatore PI della rete rappresenta la corrente di sequenza diretta richiesta alla rete di alimentazione in alternata.

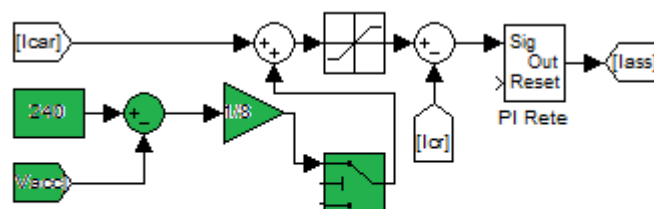


Figura 8.18: ricarica dell'accumulo

La ricarica dell'accumulo: questa parte dello schema ha la funzione di ricaricare l'accumulo quando la sua tensione si trova sotto i 240V.

Il principio è quello di aggiungere un contributo alla corrente del carico richiesta, che risulterà più alta o più bassa in funzione della tensione misurata sull'accumulo.

Inizialmente si fa la differenza tra il valore di riferimento 240 e la tensione misurata sull'accumulo.

La tensione misurata sull'accumulo arriva dal blocchetto "from" in figura 8.18 e il rispettivo blocchetto "goto" si può vedere evidenziato in figura 8.11.

Il valore numerico 600 invece è ottenuto tramite il semplice impiego di una costante.

Si moltiplica poi questa differenza per $1/8$ attraverso un blocchetto di guadagno al fine di pesarlo correttamente rispetto ai contributi di corrente del carico a cui andrà sommato.

Successivamente c'è un blocchetto "switch" che, come per l'altro regolatore, in condizioni normali si limita a far passare il segnale.

Infine il contributo trovato viene aggiunto sotto forma di corrente aggiuntiva (o detrattiva) alla corrente richiesta dal carico.

Il blocchetto di saturazione esaminato precedentemente impedisce di fatto che sia la somma di questi due contributi a non essere negativa e non i due contributi presi singolarmente.

Avendo come tensione minima 150V, il ΔV massimo sarà di 90V, che moltiplicati per $1/8$ e riportati in A risulteranno essere 11,25A.

Il circuito è dimensionato per lavorare a una potenza nominale di 50kW, con 600V di tensione nominale risulta una corrente nominale di circa 83A, il tutto lato continua.

Da questi valori risulta che la massima potenza richiedibile in più per la ricarica dell'accumulo è di 6,75kW, cioè il 13,5% della nominale.

Questo valore è difficilmente raggiungibile perché è quello corrispondente a una tensione sull'accumulo di 150V.

Scegliendo un valore di questo tipo come massimo avremo che solitamente il contributo sarà intorno ai 5kW cioè al 10%.

Inoltre è bene sottolineare che questo sovraccarico sarà di breve durata visto che l'accumulo è dimensionato unicamente per funzionare in transitorio e non da sostituto della rete.

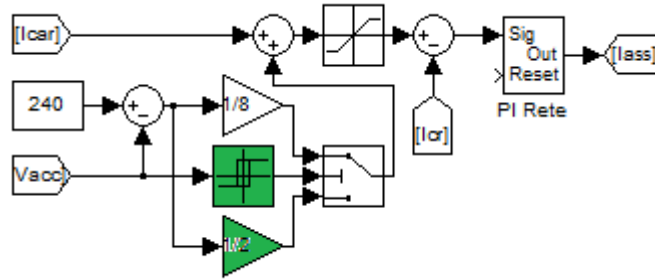


Figura 8.19: limitatore di tensione minima

Il limitatore di tensione minima: questa è la parte del limitatore precedentemente descritto, che limita la tensione sull'accumulo a 150V, che si trova sul regolatore della rete.

La parte di limitatore sul regolatore dell'accumulo si trova in figura 8.15 seguita dalla relativa descrizione.

La parte di limitatore sul regolatore della rete, al contrario della parte che agisce sul regolatore dell'accumulo che sostituisce il regolatore PI del normale funzionamento con uno diverso, consiste nella sostituzione del blocchetto di guadagno del normale funzionamento con uno di valore superiore.

In questo caso si passa da un guadagno di $1/8$ a un guadagno di $1/2$, ottenendo un'uscita di 4 volte superiore rispetto al caso precedente.

Il risultato è che il regolatore vedrà una corrente molto superiore può superare il 50% in più del valore nominale.

Nonostante questo elevato incremento della corrente richiesta alla rete è bene sottolineare che oltre ad essere, proprio come prima, una condizione transitoria, la dinamica della rete è relativamente lenta: è quindi piuttosto probabile che il regolatore ristabilisca una tensione sufficientemente elevata sull'accumulo prima che la corrente richiesta alla rete abbia raggiunto un valore così elevato.

Un ulteriore elemento che evidenzia l'improbabilità del raggiungimento di valori dell'ordine di $1,5 \cdot I_n$ è il fatto che l'accumulo viene dimensionato per funzionare a tensioni che non provochino l'intervento dei due limitatori: il fatto quindi che questo limitatore sia entrato in funzione significa già che si è in condizioni di emergenza.

Questo nuovo guadagno viene inserito utilizzando il blocchetto "switch" precedentemente accennato.

Il controllo del blocchetto “switch” è identico a quello effettuato sul blocchetto “switch” del regolatore dell’accumulo e ha ovviamente gli stessi valori di soglia di tensione d’accumulo nel blocchetto a isteresi: quando la tensione dell’accumulo scende sotto i 154V il blocchetto “switch” scatta e inserisce il nuovo guadagno.

Il blocchetto “switch” ritorna alla sua posizione standard quando la tensione dell’accumulo torna ad almeno 156V.

Come si nota le due parti di limitatore sui due regolatori agiscono in maniera simultanea.

Il motivo delle soglie superiori al valore 150V è già stato discusso sulla parte di limitatore sul regolatore dell’accumulo.

LO SCHEMA DELLA RETE IN ALTERNATA

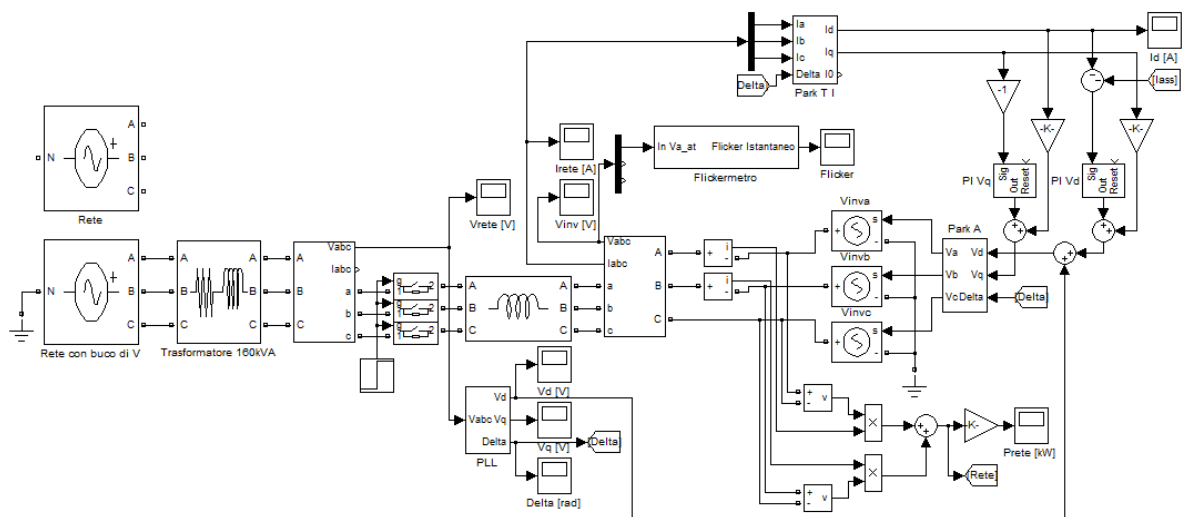


Figura 8.20: schema della rete

Quest’ultima sezione dello schema è il modello della rete in alternata a 400V.

In figura 2.7 è possibile vedere il corrispondente schema concettuale con la relativa spiegazione che verrà comunque qui ripresa.

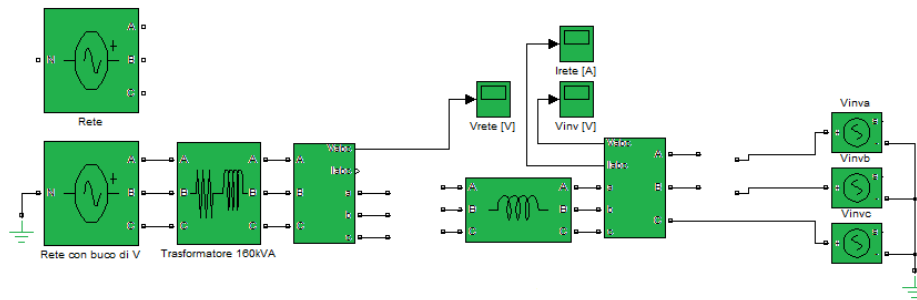


Figura 8.21: circuito trifase

Il circuito trifase: è la parte principale dello schema della rete in alternata, esso è composto dai principali blocchi di potenza.

Il primo grande da sinistra verso destra rappresenta la rete di alimentazione esterna: essa viene considerata senza perdite, ha una frequenza nominale di 50Hz e una tensione nominale di 400V.

I blocchi che rappresentano la rete esterna mostrati in figura sono in realtà due: uno rappresenta la rete in condizioni standard, l'altro è utilizzato solo per la simulazione dei buchi di tensione che è descritta nel rispettivo capitolo.

In entrambi i casi il centro stella della rete esterna viene collegato a terra.

Subito dopo la rete di alimentazione si trova un trasformatore: esso ha scopo unicamente di isolamento, infatti ha $k=1$ e indice orario pari a 0. Vista la potenza dei carichi da alimentare si è scelta una potenza nominale di 160kVA, una $V_{cc}\%$ del 4% e un $\cos(\varphi)_{cc}$ di 0,3.

Il blocco centrale con disegnata una bobina rappresenta il filtro del raddrizzatore, che è modellizzato come un'induttanza serie sulle tre fasi di valore 0,1mH.

I tre generatori di tensione pilotati sulla destra rappresentano le tensioni in ingresso al raddrizzatore: anche essi hanno il centro stella collegato a terra e i loro segnali pilotanti verranno descritti in seguito in questo capitolo.

I due blocchi a destra e a sinistra del filtro sono entrambi dei blocchi di misura trifase, essi hanno la funzione di misurare le tensioni e le correnti che li attraversano.

Essendo i due blocchi in serie le correnti che li attraversano sono le stesse e vengono quindi visualizzate un'unica volta prelevando i valori dal blocco di destra.

Le tensioni invece vengono visualizzate da entrambi i blocchi: dal blocco di sinistra si visualizzano le tensioni della rete, dal blocco di destra invece si visualizzano le tensioni del raddrizzatore lato alternata.

Per la visualizzazione di queste grandezze si utilizzano sempre dei blocchetti "scope".

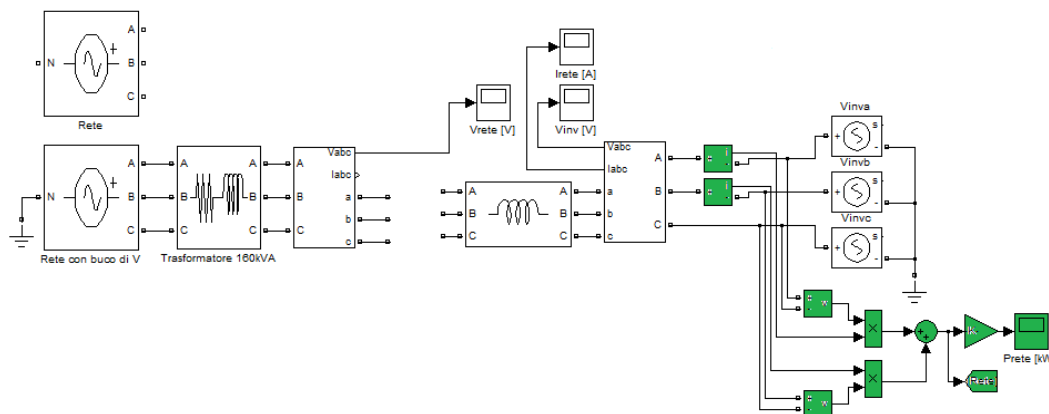


Figura 8.22: misura di potenza

La misura di potenza: questa parte dello schema serve a misurare la potenza attiva che viene trasferita dalla rete al carico, per effettuare tale misura si utilizza un'inserzione Aron.

L'equazione impiegata per calcolare la potenza è la seguente:

$$P = v_{13} \cdot i_1 + v_{23} \cdot i_2$$

Come si vede dalla figura 8.22 ci sono due amperometri e due voltmetri, essi hanno la funzione di misurare le correnti e le tensioni della precedente equazione.

Successivamente i valori di tensioni e correnti appena misurati vengono inviati a due blocchetti moltiplicatori che eseguono le due moltiplicazioni $v \cdot i$.

Infine il blocchetto sommatore completa l'equazione.

A valle del blocchetto sommatore si trova un blocchetto "scope" che visualizza la potenza trasferita dalla rete in alternata alla rete in continua a 600V.

Il blocchetto di guadagno tra il blocchetto sommatore e il blocchetto “scope” ha la funzione di convertire i W in kW.

A valle del blocchetto sommatore si trova anche un blocchetto “goto” che trasferisce la potenza così misurata al lato carico, il suo corrispondente blocchetto “from” è quello che comanda il generatore di corrente pilotato in figura 8.5.

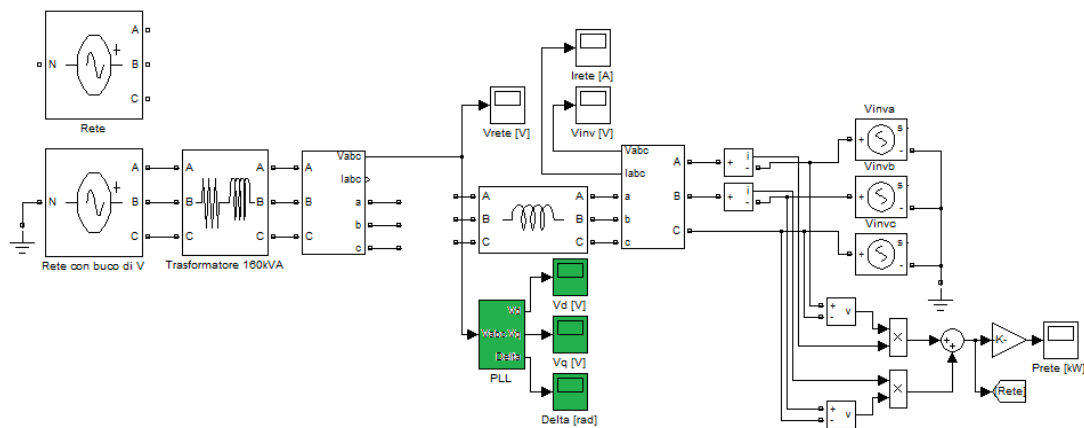


Figura 8.23: PLL

Il PLL: questo è un elemento molto importante in quanto serve a sincronizzare il raddrizzatore con la rete di alimentazione esterna.

Il PLL è stato realizzato all’interno di un sottosistema il cui schema interno è rappresentato di seguito in figura 8.24.

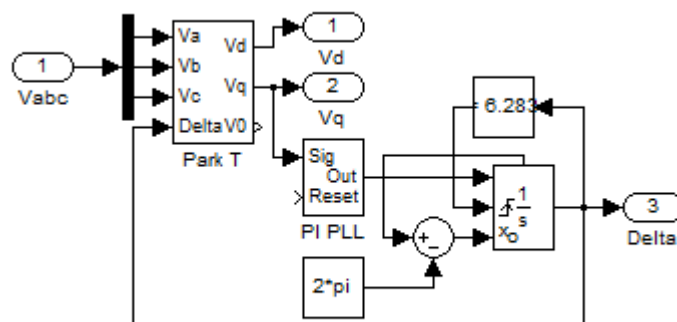


Figura 8.24: schema interno del PLL

Il PLL riceve in ingresso le tre tensioni di fase che divide tra loro con un blocchetto “demux”, esse vengono poi immesse insieme al delta di Park in un blocchetto che esegue la trasformata di Park.

La trasformata di Park con le grandezze che coinvolge è richiamata nel capitolo 2.

Lo schema interno del blocchetto che esegue la trasformata di Park è mostrato in figura 8.25.

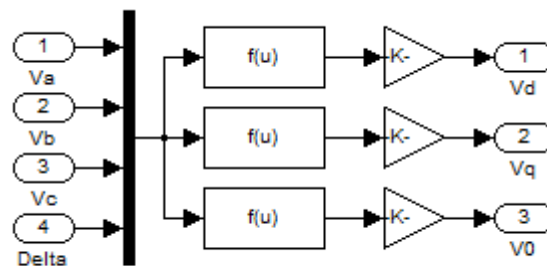


Figura 8.25: schema interno della trasformata di Park

Il blocchetto della trasformata di Park restituisce come uscita le tre tensioni di Park.

Poiché, come già anticipato nel capitolo 2, nella rete non c'è alcun tipo di componente omopolare, la V_0 in uscita dalla trasformata non verrà utilizzata.

Le altre due tensioni di Park appena calcolate costituiscono le prime due uscite del PLL e vengono visualizzate entrambe in due blocchetti “scope”.

Per sfruttare meglio la linea si vuole funzionare a $\cos(\varphi)=1$, che come anticipato nel capitolo 2 vuol dire avere $V_q=0$: per fare ciò bisogna scegliere un delta di Park opportuno che la azzeri.

Come già visto precedentemente un buon regolatore che tende ad azzerare il suo ingresso è il regolatore di tipo PI: per tale regolatore si utilizza un $K_p=0,5$ e un $K_i=100$, l'ingresso è ovviamente la V_q in uscita dalla trasformata.

I valori delle costanti K_p e K_i appena menzionati sono scelti tali essendo quelli tipicamente utilizzati per realizzare un PLL.

Il regolatore PI appena impiegato fornisce come uscita l'omega di Park che va integrata con l'apposito blocchetto integratore per ottenere il delta di Park.

L'integratore utilizzato, visibile in figura 8.24 è un integratore particolare, si vuole infatti limitare la sua uscita tra 0 e 2π : per fare ciò abilito, oltre all'ingresso standard

del segnale, anche gli ingressi di reset e di stato iniziale e oltre all'uscita standard del segnale, anche un'uscita che indica lo stato dell'integratore.

L'ingresso di reset serve, come dice il nome, a resettare l'integratore e ciò avviene prendendo il segnale d'uscita e comparandolo al valore $2*\pi$, se l'uscita è maggiore o uguale di questo valore avviene il reset.

L'uscita di stato viene prelevata e gli viene sottratto sempre il valore $2*\pi$, tale differenza viene poi messa in ingresso alla porta dello stato iniziale.

In uscita all'integratore ottengo così il delta di Park, che risulterà limitato tra zero e $2*\pi$.

La forma d'onda del delta di Park è, a regime, periodica a rampe crescenti come si vede anche in figura 3.2.

Il delta così ottenuto viene utilizzato in retroazione in ingresso alla trasformata di Park.

Il delta di Park costituisce inoltre la terza uscita del PLL e, come le due tensioni, viene visualizzato anche esso con un blocchetto "scope".

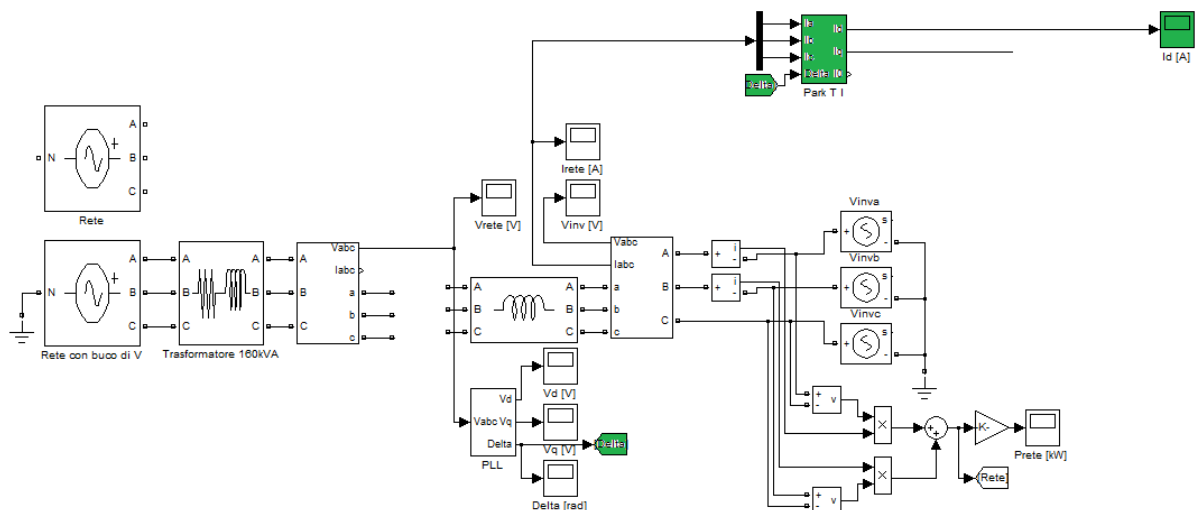


Figura 8.26: trasformata di Park delle correnti

La trasformata di Park delle correnti: una volta trovato il delta di Park con il PLL esso viene impiegato per tutto il modello.

Per portare il delta di Park in altre zone dello schema in modo ordinato si impiega un blocchetto "goto".

La trasformata di Park delle correnti è realizzata allo stesso modo di quella delle tensioni: il blocchetto che la esegue è identico a quello interno al PLL utilizzato per le tensioni e si può vedere il suo schema interno in figura 8.25.

Ovviamente in questo caso tutte le grandezze che prima erano etichettate come tensioni risultano adesso delle correnti.

Si pongono come ingressi del blocchetto che esegue la trasformata le correnti misurate lungo la linea, separandole tra loro con un blocchetto "demux".

Il delta utilizzato è, come anticipato, quello trovato con il PLL e viene prelevato da un blocchetto "from".

Anche in questo caso la componente omopolare non ha alcuna utilità e non viene utilizzata.

Le componenti delle correnti sugli assi d e q vengono invece prese come uscite e la corrente I_d viene anche visualizzata con un blocchetto "scope".

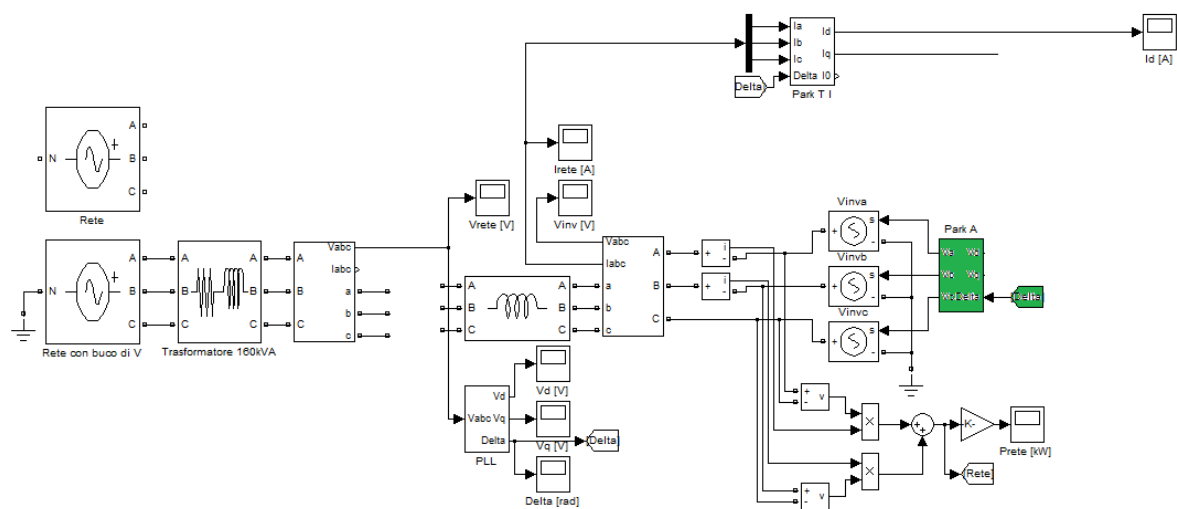


Figura 8.27: antitrasformata di Park

L'antitrasformata di Park: per pilotare i generatori di tensione che rappresentano le tensioni del raddrizzatore lato alternata servono le grandezze di fase e, poiché si sta lavorando con le grandezze di Park, c'è bisogno di un blocco che opera l'antitrasformata.

In uscita dal blocco di antitrasformata ci sono ovviamente le tensioni di fase che vengono collegate ai tre generatori mentre in ingresso si trovano le tensioni sugli assi d e q e il delta di Park.

Mentre le due tensioni verranno calcolate successivamente, il delta è sempre lo stesso e viene prelevato da un altro blocchetto "from".

Utilizzando lo stesso delta di Park che caratterizza le tensioni della rete esterna anche per il raddrizzatore si ottengono tensioni tra loro in fase.

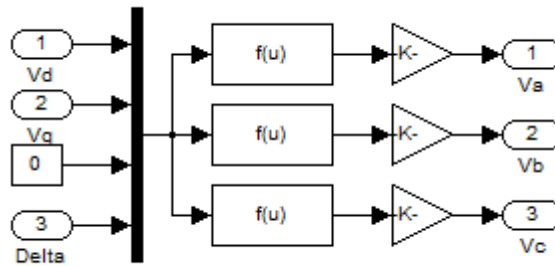


Figura 8.28: schema interno dell'antitrasformata di Park

Lo schema interno dell'antitrasformata di Park si può vedere in figura 8.28.

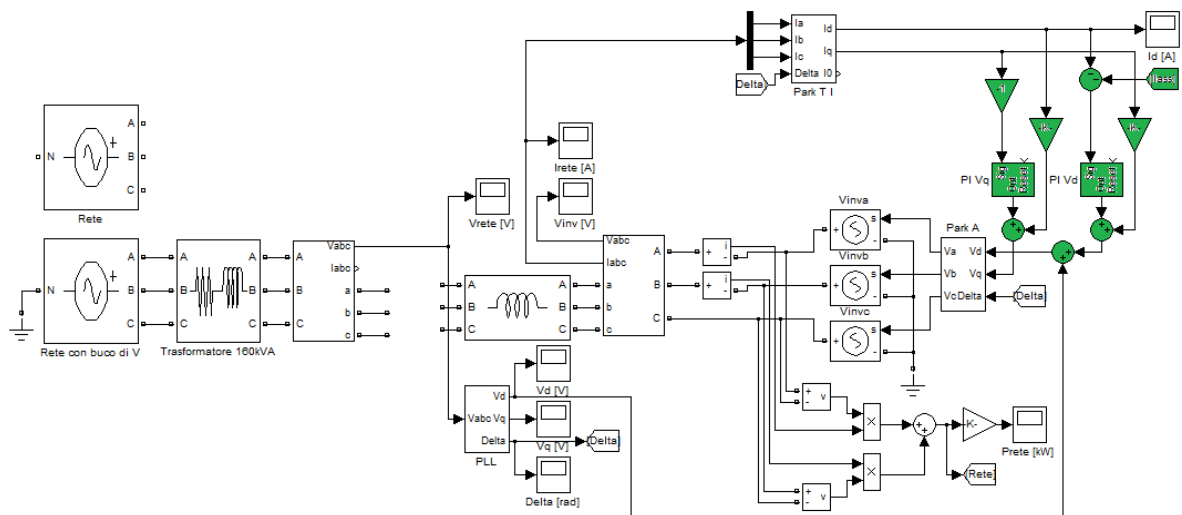


Figura 8.29: calcolo delle tensioni di Park del raddrizzatore

Il calcolo delle tensioni di Park del raddrizzatore: per calcolare le tensioni sugli assi d e q si utilizzano delle equazioni costituite da 3 termini: per maggior chiarezza dello schema analizzeremo separatamente questi tre termini.

Termini V_d e V_q di rete: i primi termini sono costituiti dalla corrispondente tensione lato rete (quindi $V_{d,rete}$ per la V_d e $V_{q,rete}$ per la V_q).

Poiché la V_q di rete è uguale a zero (per opera del PLL) non viene sommata visto che darebbe solo interferenze durante la sincronizzazione.

La V_d di rete invece costituisce il primo termine in somma della V_d di raddrizzatore e viene collegata direttamente attraverso un nodo sommatore come si vede in figura 8.29.

Termini $-\omega^*L^*I_q$ e $\omega^*L^*I_d$ (dove ω è la pulsazione di rete e L è l'induttanza del filtro): questi secondi termini sono mutui e quindi si sommano sugli assi opposti (d su q e q su d), in questo caso sono entrambi diversi da zero.

Anche questi termini si collegano direttamente ai nodi sommatore: le correnti vengono prelevate dalla trasformata di Park delle correnti e le moltiplicazioni per $\pm\omega^*L$ avvengono nei due blocchetti di guadagno.

Gli ultimi termini sono termini con un operatore di derivata delle correnti rispetto al tempo moltiplicato per l'induttanza L : poiché il blocchetto derivatore crea diversi disturbi si sceglie invece di utilizzare due PI.

Si deve sottolineare che questi due PI non hanno la funzione di regolazione e dovrebbero quindi teoricamente essere istantanei: ciò ovviamente non è possibile ma si può ottenere comunque un ottimo risultato rendendoli sufficientemente più veloci dei PI dei regolatori.

Si scelgono quindi per entrambi i PI, che devono essere identici, un K_p pari a 20 e un K_i pari a 200.

In ingresso al PI della V_q c'è solo la corrente I_q mentre in ingresso al PI della V_d , oltre alla corrente I_d , c'è anche il blocchetto "from" che porta il segnale in arrivo dall'uscita del regolatore della rete (figura 8.17) ed è proprio questo blocchetto che provoca le variazioni nella potenza prelevata dalla rete.

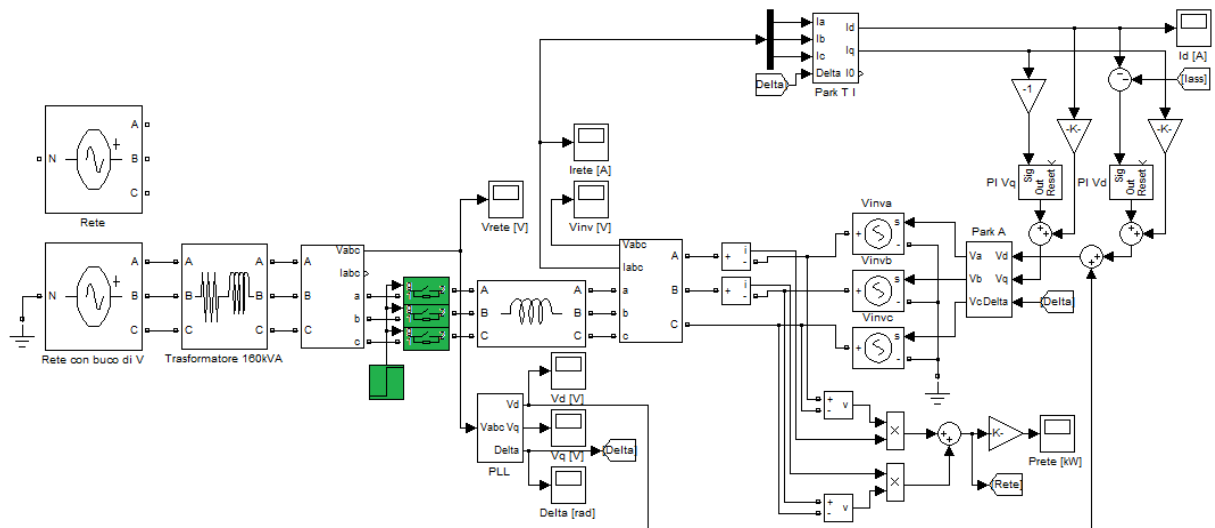


Figura 8.30: interruptori di sincronizzazione

Gli interruptori di sincronizzazione: come si è visto, sia la rete esterna che il raddrizzatore, utilizzano il medesimo delta di Park e tutto lo schema è sincronizzato su di esso grazie al PLL.

Se tutta la rete si attivasse simultaneamente all'istante $t=0$ il PLL non avrebbe il tempo di sincronizzare rete esterna e raddrizzatore e si provocherebbero transitori con correnti elevatissime.

Per evitare ciò è sufficiente dar tempo al PLL di sincronizzare rete esterna e raddrizzatore prima di collegarli insieme.

Si mettono quindi tre interruptori sulle tre fasi appena prima del filtro: tali interruptori sono inizialmente aperti e dopo un tempo sufficiente vengono chiusi collegando elettricamente tutta la rete in alternata.

Nonostante la sincronizzazione avvenga in un tempo inferiore gli interruptori vengono chiusi, per sicurezza, tutti insieme dopo 0,5s da un blocchetto che genera un segnale a gradino.

Naturalmente durante la sincronizzazione non c'è alcun carico collegato.

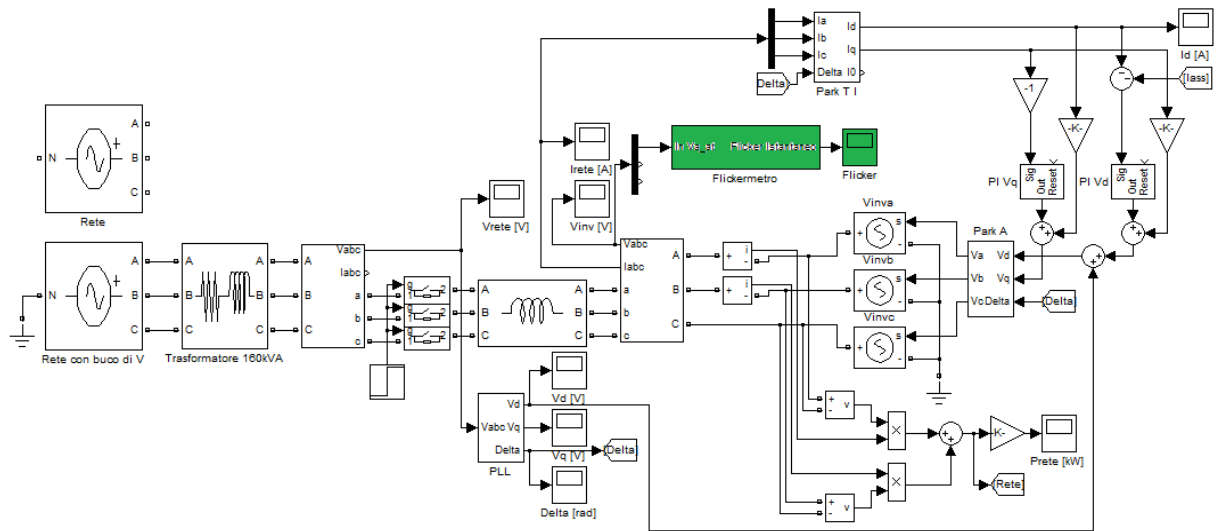


Figura 8.31: misura del flicker

La misura del flicker: l'ultima parte dello schema della rete in alternata è costituita dalla misura del flicker.

Essa viene effettuata sulla tensione del raddrizzatore prendendo solo la V_a , questo perché la misura del flicker si effettua in monofase.

La misura sulle altre due fasi non è necessaria essendo tutto il sistema simmetrico ed equilibrato.

La tensione V_a entra in ingresso al flickermetro che restituisce in uscita il flicker istantaneo.

Anche questa uscita viene visualizzata in un blocchetto "scope".

LA STRUTTURA INTERNA DEL FLICKERMETRO

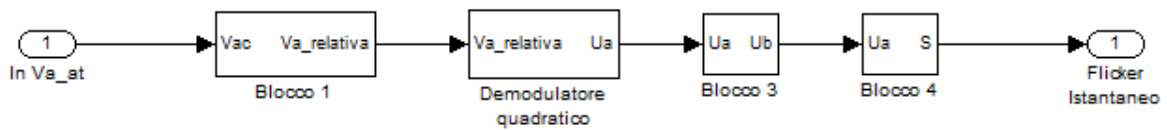


Figura 8.32: blocchi del flickermetro

I blocchi del flickermetro: come visto nel capitolo 1 i blocchi che compongono il flickermetro sono 5, tuttavia il flickermetro utilizzato in questa tesi contiene solo i primi 4.

In questa sezione verrà descritta solo la struttura dei blocchetti, le loro funzionalità sono invece descritte nel capitolo 1.

Il quinto blocco non rappresentato è quello che esegue l'analisi statistica in tempo reale: questo modello infatti non è realizzato per fornire una precisa misura del flicker ma solo per valutarne in linea di massima la variazione in presenza di un sistema di accumulo.

Il flickermetro, inoltre, è l'unico blocco del modello non realizzato al fine di questa tesi ma preso già modellizzato secondo la rispettiva norma CEI.

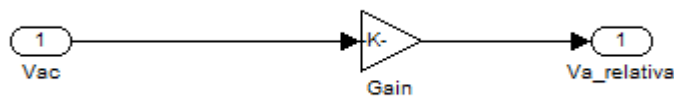


Figura 8.33: blocco 1 (adattatore di tensione)

L'adattatore di tensione: il primo blocco è molto semplice ed è composto solo da un blocchetto di guadagno, tale blocchetto riceve il valore assoluto della tensione di fase in ingresso e lo restituisce come valore in p.u.

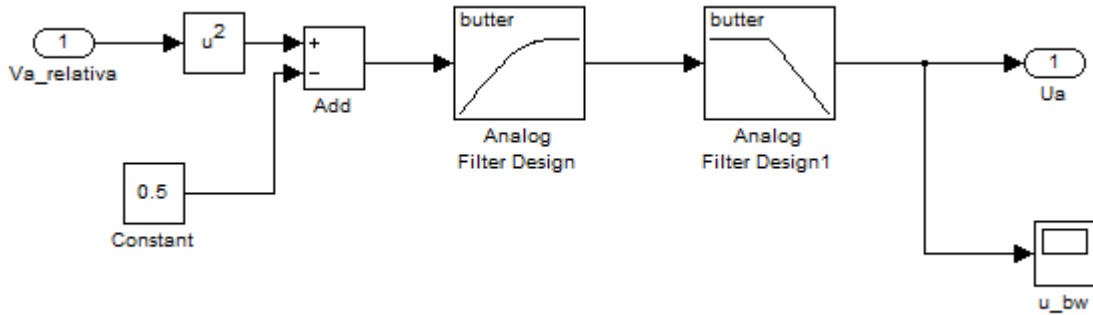


Figura 8.34: blocco 2 (demodulatore quadratico)

Il demodulatore quadratico: la tensione in p.u. in ingresso viene elevata al quadrato attraverso il blocchetto che esegue tale operazione e successivamente le viene sottratto il valore 0,5 (che proviene da un blocchetto che genera tale costante) attraverso un blocchetto sommatore.

Infine ci sono due filtri in cascata: il primo passa-alto e il secondo passa-basso, l'uscita oltre a passare al blocco successivo può essere visualizzata in un blocchetto "scope".

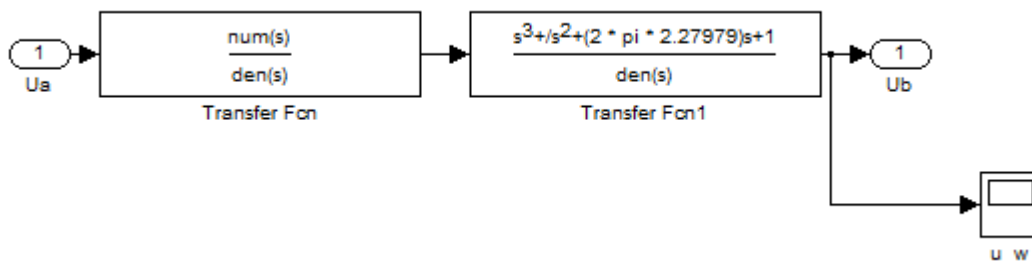


Figura 8.35: blocco 3 (primo filtro)

Il primo filtro: il primo dei due filtri di pesatura, elevazione al quadrato e livellamento è composto da due funzioni di trasferimento in cascata.

Anche in questo caso c'è un blocchetto "scope" che permette la visualizzazione dell'uscita di questo blocco.

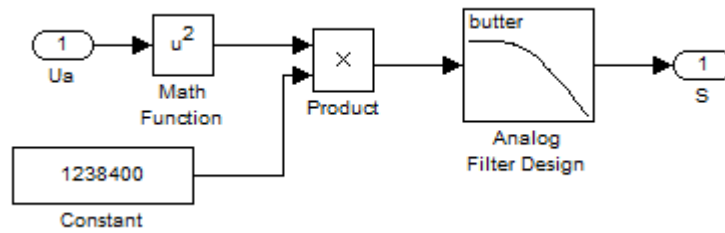


Figura 8.36: blocco 4 (secondo filtro)

Il secondo filtro: il secondo dei due filtri di pesatura, elevazione al quadrato e livellamento è composto da un blocchetto di elevazione al quadrato, un blocchetto che moltiplica il segnale per una costante e un filtro passa basso.

L'uscita di questo blocco è il flicker istantaneo, che verrà utilizzato nelle simulazioni per valutare le variazioni di flicker.

Fonti

- [1] E. Tironi, "Impianti elettrici", 2010
- [2] Norma CEI EN 61000-4-15
- [3] D. Merli, "Confronto tecnico-economico tra i vari sistemi di accumulo di energia"
- [4] "Sistemi di accumulo dell'energia elettrica" in Rivista ufficiale dell'AEIT, maggio 2008
- [5] M. Baran, N.R. Mahajan, "DC distribution for industrial Systems: opportunities and challenges" in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 6, nov-dic 2003
- [6] C. Attianese, V. Nardi, G. Tomasso: "High Performances Supercapacitor Recovery System For Industrial Drive Applications", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004
- [7] N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, "Power electronics: converters, applications, and design" 2003
- [8] P.F. Riberio, B.K. Johnson, M.L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu: "Energy Storage System for Advanced Power Applications", 2001
- [9] M. Brenna, G.C. Lazaroiu, E. Tironi, "High Power Quality and DG Integrated Low Voltage DC Distribution System" in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006
- [10] A. Du Pasquier, I Plitz, J. Gural, S. Menocal, G. Amatucci, "Characteristics and performance of 500F asymmetric hybrid advanced supercapacitor prototypes", Journal of Power Sources, agosto 2009
- [11] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, A. Berthon, "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling", Journal of Power Sources, marzo 2007
- [12] M. Brenna, E. Tironi, G. Ubezio, T. Kaipia, J. Lassila, P. Salonen, J. Partanen, "Distributed generation in DC distribution system", CIRED Conference, 2007

- [13] B.K. Johnson, R.H. Lasseter, "An industrial power distribution system featuring UPS properties" in Proceedings of 24th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC, 1993
- [14] D. Casadei, G. Grandi, C. Rossi: "A supercapacitor based power conditioning system for power quality improvement and uninterruptible power supply", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2002
- [15] T. Kaipia, J. Lassila, P. Salonen, J. Partanen, "Application of low voltage DC-distribution system - a techno-economical study", Proceedings CIRED Conference, 2007
- [16] A. Bertani, "Management of LV Grids with High Penetration of Distributed Generation: concepts, implementations and experiments", CIGRE General Session, 2006

Ringraziamenti

Al Professor Tironi: per avermi aiutato molto nella realizzazione e nella correzione di questa tesi, per avermi spinto a dare di più e per avermi dedicato così tanto tempo, senza il suo aiuto i risultati non sarebbero stati gli stessi.

All'Ingegnere Piegari: per avermi aiutato nella realizzazione del modello in Simulink impiegato in questa tesi, per avermi insegnato molte cose a riguardo e per tutte le volte che mi ha aiutato a risolvere i problemi che si presentavano.

Ai miei genitori: per avermi dato l'opportunità di andare all'università, aiutandomi nelle scelte senza mai forzarmi.

A Marta: per essermi stata vicino in questi due anni, per il supporto morale che mi ha dato e per avermi aiutato a lavorare sulla tesi e a studiare in momenti in cui non sarei riuscito.