

Laboratorio di Fisica dei Dispositivi Integrati
A.A. 2009/2010

Luca Geretti

15 novembre 2009

Indice

- Introduzione** **2**

- 1 Reti elettriche** **4**
- 1.1 Nozioni di base 4
- 1.1.1 Definizione di un circuito 5
- 1.1.2 Risoluzione di un circuito 6
- 1.2 Bipoli generatori 7
- 1.3 Bipoli utilizzatori 8
- 1.3.1 Il resistore 8
- 1.3.2 Il condensatore 15
- 1.3.3 L'induttore 19
- 1.4 Circuiti di ordine superiore 21

Introduzione

L'obiettivo di questa dispensa è fornire un supporto di riferimento relativo all'attività di laboratorio del corso di Fisica dei Dispositivi Integrati.

L'attività di laboratorio consiste nell'utilizzo di un pacchetto software di design e simulazione di circuiti chiamato Micro-Cap, disponibile in ambiente Windows. La versione per studenti, liberamente scaricabile dal sito ufficiale della Spectrum Software, possiede tutte le funzionalità della versione commerciale ma è limitata nella complessità dei circuiti trattabili; per l'utilizzo che verrà fatto dello strumento in laboratorio tale limitazione non è rilevante.

Esistono svariati pacchetti software, gratuiti o a pagamento, che presentano funzionalità simili a quelle offerte da Micro-Cap. Tutti questi si basano su un approccio simulativo chiamato SPICE, ormai standard industriale del settore, specificamente ideato per analizzare in maniera accurata la dinamica di circuiti complessi. Un simulatore SPICE in generale accetta in ingresso una descrizione del circuito attraverso una *netlist*, ovvero una lista di istanze di componenti elettrici ognuno corredato dai nomi dei terminali che presenta (due componenti che condividono lo stesso nome di terminale sono direttamente collegati fra loro) e dai parametri del componente stesso (p.e. il valore della resistenza di un resistore). Tale netlist può essere costruita manualmente oppure essere il risultato di una fase di design grafico, come nel caso dei pacchetti software moderni. Un simulatore SPICE utilizza metodi numerici di risoluzione dei circuiti ed è in grado di effettuare principalmente le seguenti analisi:

- *DC*: per ingressi in continua, calcola i valori di riposo di correnti e tensioni del circuito al variare dell'ampiezza del segnale d'ingresso;
- *AC*: per ingressi di tipo sinusoidale, calcola i valori di correnti e tensioni del circuito al variare della frequenza del segnale d'ingresso;
- *Transient*: data una certa evoluzione degli ingressi, calcola i valori corrispondenti di correnti e tensioni del circuito.

L'uscita dell'analisi simulativa è data dai valori (nell'ampiezza, nella frequenza o nel tempo, in base al tipo di analisi) delle correnti/tensioni che si vogliono osservare. Per questo laboratorio verranno utilizzate solamente le analisi in continua ed in transitorio, in quanto l'analisi in alternata richiede la conoscenza di concetti di *analisi ai piccoli segnali* e dei relativi modelli per i componenti elettrici utilizzati.

Dal punto di vista operativo, dunque, l'analisi di circuiti attraverso Micro-Cap è costituita dalle seguenti fasi:

1. Descrizione del circuito attraverso uno *schematics editor*, ovvero un frontend grafico che permette di costruire visivamente il circuito attraverso l'inserimento di componenti elettrici e relative interconnessioni;
2. Specifica del tipo di analisi da svolgere;
3. Definizione dei segnali del circuito che si vogliono osservare una volta completata l'analisi;
4. Esecuzione dell'analisi e visualizzazione delle forme d'onda dei segnali interessati.

Grazie all'ausilio grafico, una volta completata la descrizione del circuito è possibile ottenere le forme d'onda dei segnali desiderati con pochi semplici passi. Analogamente, è possibile modificare in modo rapido lo schema del circuito e ripetere l'analisi per individuare le differenze nei segnali interessati.

Capitolo 1

Reti elettriche

1.1 Nozioni di base

Una rete elettrica (o più comunemente circuito elettrico) è data dall'interconnessione di componenti elettrici allo scopo di formare percorsi chiusi, o *maglie*, attraverso le quali una *corrente* è in grado di scorrere. Ogni maglia è costituita da più *rami* collegati fra loro. La risoluzione di un circuito elettrico si basa sull'assunzione che le proprietà elettromagnetiche¹ del circuito siano descrivibili attraverso parametri concentrati, ossia sia possibile introdurre un numero finito di componenti elettrici, ognuno con un certo numero di *poli* (o “capi” o “terminali”), connessi fra loro. Questo permette di avere un numero finito di *nodi*, ovvero di regioni del circuito in ognuna delle quali la *tensione*, che rappresenta il potenziale elettrico in un circuito, assume stesso valore. Tali nodi sono individuati per ogni terminale, ma poichè i terminali sono interconnessi il numero di nodi è inferiore². Infine, in generale ogni componente è caratterizzato da una precisa equazione differenziale ordinaria nelle variabili di *tensione* (diversa per ogni punto di interconnessione fra componenti) e *corrente* (diversa per ogni ramo).

Fra le diverse tipologie di componenti elettrici esistenti, in questo Capitolo ci concentreremo sui *bipoli* elettrici, caratterizzati appunto dalla presenza di due soli poli elettrici (“positivo” e “negativo”). Un bipolo introdotto in un circuito avrà una differenza di tensione v fra i due poli³ e sarà attraversato da una unica corrente i , con una equazione caratteristica nella forma

$$f(i, v, i', v') = 0 \quad (1.1)$$

dove i' e v' sono le derivate prime nel tempo di corrente e differenza di tensione. Una rappresentazione completa di un bipolo elettrico generico è mostrata in Fig. 1.1.

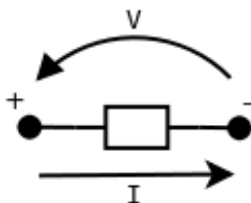


Figura 1.1: Un bipolo elettrico generico.

Si noti che la rappresentazione di Fig. 1.1 non implica che la corrente non possa scorrere nel verso opposto (così come il terminale positivo non deve necessariamente avere una tensione maggiore di quello negativo),

¹Ottenibili attraverso l'applicazione puntuale delle Equazioni di Maxwell.

²Entreremo a breve nel dettaglio di questo aspetto.

³Calcolata come sottrazione tra il valore della tensione al polo positivo e quello al polo negativo.

bensì consente unicamente di interpretare correttamente il segno di correnti e differenze di tensione che risultino dalla risoluzione (manuale o automatica) del circuito. Inoltre, la notazione grafica è decisamente ridondante: possiamo ottenere un risultato più snello rimuovendo il ramo relativo alla differenza di tensione, nonchè eliminare l'annotazione del polo negativo; anche la convenzione del verso della corrente può essere convenientemente rimossa qualora si rammenti che la corrente è assunta entrante nel polo positivo.

Dal punto di vista funzionale, si distinguono due classi di bipoli: bipoli *generatori*, che sviluppano potenza elettrica (equivalentemente, generano energia elettrica), e bipoli *utilizzatori* che la sfruttano⁴.

Un circuito ha l'ovvia funzionalità ultima di trasformare segnali di ingresso in opportuni segnali di uscita. Si noti però che a livello elettrico, rispetto al livello logico, non vi è una chiara definizione di "direzione" dei segnali, in quanto tutte le grandezze in gioco (correnti e differenze di tensione) sono mutuamente influenzate fra loro. Qualora si voglia studiare il comportamento di un circuito al variare dei suoi ingressi, i bipoli generatori vengono utilizzati come ingressi mentre le uscite sono rappresentate dai valori di corrente e differenza di tensione di determinati bipoli utilizzatori. Qualora invece si voglia studiare il comportamento di un circuito al variare delle sue uscite, i bipoli generatori rappresentano le uscite mentre i bipoli utilizzatori forniscono i valori degli ingressi. La necessità di svolgere questo duplice tipo di analisi ha portato ad introdurre il concetto di *doppio bipolo elettrico*, mostrato in Fig. 1.2.

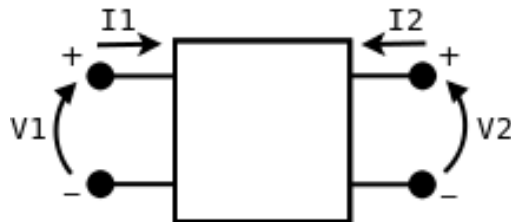


Figura 1.2: Un doppio bipolo elettrico generico.

Un doppio bipolo è un componente caratterizzato da 4 terminali, di cui due sono comuni, mentre la corrente che entra dal polo in un lato (destro o sinistro) è uguale alla corrente che esce dallo stesso lato. Questo significa che un doppio bipolo è descritto da due sole differenze di tensione v_1 e v_2 , nonchè da due correnti i_1 e i_2 , tipicamente con convenzione entrante per entrambe le correnti. All'interno del doppio bipolo è possibile qualunque interconnessione di componenti più complessi. Questo modello, per quanto possa sembrare restrittivo, permette di descrivere agevolmente un circuito suddividendolo in *stadi*: gli stadi iniziale e finale rappresentano gli ingressi o le uscite del circuito e vengono descritti da bipoli generatori ed utilizzatori, mentre ogni stadio intermedio corrisponde ad un doppio bipolo.

1.1.1 Definizione di un circuito

Per costruire un circuito corretto è necessaria la presenza di almeno un bipolo generatore e di uno utilizzatore; in aggiunta, poichè la tensione è definita a meno di una costante, è necessario individuare un nodo che funge da *massa virtuale*, ovvero avente una tensione pari a zero⁵. In Figura 1.3 vediamo un esempio di circuito generico, in cui sono presenti

- 3 maglie⁶: X , Y e Z ;
- 3 rami: a , b e c ;
- 5 nodi: A fino ad E ;

⁴Le modalità in cui è sfruttata diverranno chiare nella prossima Sezione.

⁵Nel seguito chiameremo la massa virtuale semplicemente "massa". Si noti inoltre che la tensione in un punto rappresenta di fatto una differenza di tensione fra il punto stesso e la massa.

⁶Tre percorsi chiusi diversi, non mostrati in figura, a cui ci riferiamo con "X" per il percorso attraverso i rami a e b , "Y" per il percorso attraverso i rami b e c , e "Z" per il percorso attraverso i rami a e c .

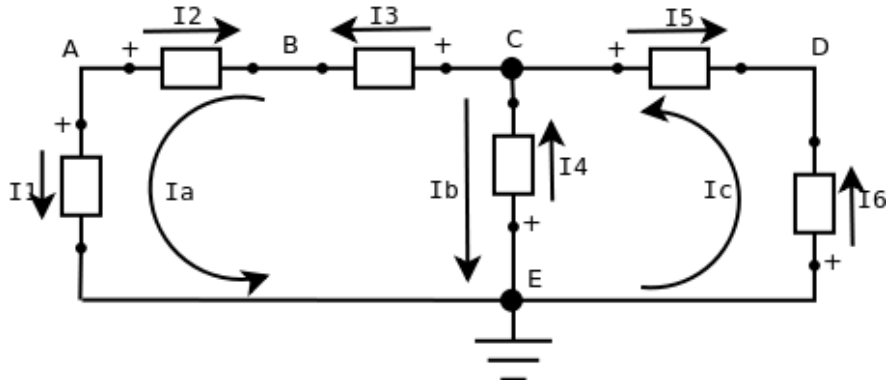


Figura 1.3: Un circuito generico in cui sono presenti generici bipoli ed il riferimento di massa.

- 6 bipoli: 1 fino a 6;
- la massa: applicata al nodo E .

I terminali dei bipoli sono contrassegnati da un cerchio piccolo, mentre per semplicità annotiamo solo il polo positivo. Infine assumiamo un verso per le correnti di ogni ramo a, b, c .

Si noti che l'orientamento dei bipoli in figura introduce una inconsistenza nei versi delle correnti: a prescindere dalla scelta del verso di i_a, i_c vi sarà sempre un bipolo che presenta corrente orientata in verso opposto alla corrente di ramo⁷. In generale questo non è un problema: la convenzione stabilisce unicamente come rapportare il verso di corrente e differenza di tensione per un dato bipolo; ciò che conta è che le correnti ai rami si conservino lungo il ramo stesso (vedere la prossima Sottosezione).

Come ultima osservazione, un nodo viene usualmente localizzato nell'intersezione fra più rami, come nel caso dei nodi C ed E ; quando invece un nodo è dato da un solo ramo⁸, il punto in cui viene localizzato è totalmente arbitrario. Va sottolineato in ogni caso come *qualunque* punto di interconnessione tra il nodo e i terminali adiacenti possieda la stessa tensione.

1.1.2 Risoluzione di un circuito

Per poter risolvere i valori di correnti e differenze di tensione in un circuito, è fondamentale introdurre le *Leggi di Kirchhoff*:

- **Legge delle correnti:** la somma delle correnti entranti/uscenti da un qualunque nodo è nulla⁹;
- **Legge delle tensioni:** la somma delle differenze di tensione attraverso una qualunque maglia è nulla¹⁰.

Le leggi sopracitate richiedono, come mostrato in Fig. 1.3, che venga preventivamente assunto in modo arbitrario il verso delle correnti per ogni ramo. Il significato della legge delle correnti è che la carica elettrica non può disperdersi, bensì può solo transitare lungo il circuito. Il significato della legge delle tensioni invece è che va rispettata la conservazione dell'energia per un percorso chiuso¹¹.

Proviamo ora ad applicare la legge delle correnti di Kirchhoff all'esempio di Fig. 1.3, limitandoci ai nodi che includono almeno 3 rami¹²:

⁷Mentre per il ramo b , essendo tutte le correnti di bipolo orientate nello stesso verso, sarebbe possibile invertire il verso i_b ed ottenere la consistenza desiderata.

⁸Il caso di due rami non è possibile, come si può facilmente verificare.

⁹Equivalentemente, la somma delle correnti entranti è uguale alla somma delle correnti uscenti.

¹⁰Equivalentemente, preso un verso di percorrenza della maglia, la somma delle differenze di potenziale dei bipoli aventi polo positivo entrante è uguale alla somma delle differenze di potenziale dei bipoli aventi polo positivo uscente.

¹¹Da qui la possibilità di definire un potenziale elettrico e conseguentemente una tensione, che è semplicemente il potenziale diviso la carica elementare di un elettrone.

¹²In quanto per i nodi che includono un solo ramo la relazione delle correnti è banale.

- Correnti al nodo C: $i_a + i_b - i_c = 0$
- Correnti al nodo E: $-i_a - i_b + i_c = 0$

dove abbiamo assunto arbitrariamente che le correnti uscenti da un nodo sono positive e quelle entranti sono negative.

Per quanto riguarda la legge delle tensioni di Kirchhoff, valgono:

- Tensioni alla maglia X: $v_1 - v_2 + v_3 + v_4 = 0$
- Tensioni alla maglia Y: $-v_4 - v_5 + v_6 = 0$
- Tensioni alla maglia Z: $v_1 - v_2 + v_3 - v_5 + v_6 = 0$

dove abbiamo assunto arbitrariamente un verso di percorrenza orario della maglia, nonchè che la differenza di tensione di un bipolo è positiva se percorriamo il bipolo dal polo negativo a quello positivo.

In aggiunta alle equazioni date dalle leggi di Kirchhoff, è necessario rispettare i vincoli di consistenza della corrente ai rami, ovvero nel nostro caso

$$\begin{aligned}
 i_1 &= i_a \\
 i_2 &= -i_a \\
 i_3 &= i_a \\
 i_4 &= -i_b \\
 i_5 &= -i_c \\
 i_6 &= i_c
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Infine la conoscenza delle equazioni caratteristiche che descrivono la dinamica dei bipoli $f_n, n = 1, \dots, 6$, unite a un insieme sufficiente di valori noti di correnti e differenze di tensione, consente la risoluzione del circuito¹³.

Nelle prossime due Sezioni andremo a trattare i bipoli più comuni all'interno di un circuito e forniremo le loro equazioni caratteristiche.

1.2 Bipoli generatori

Distinguiamo principalmente due tipi di generatori: di tensione e di corrente, mostrati rispettivamente in Fig. 1.4(a) e Fig. 1.4(b) relativamente al caso di ingressi continui.

Un generatore di tensione impone fra i suoi capi una differenza di tensione fissa

$$v(t) = V \tag{1.3}$$

Tale comportamento può essere interpretato come un *elevamento* della tensione fra il suo polo negativo e quello positivo. Sfruttando un analogo idrodinamico, una pompa in un circuito idrico sposta una massa d'acqua da una altitudine A ad una maggiore B , dalla quale l'acqua è nuovamente in grado di scendere lungo un percorso per tornare nel punto d'origine all'altitudine A ed essere elevata nuovamente. Ritornando al caso elettrico, intuiamo che nel caso di una singola maglia con un singolo generatore di tensione la corrente esce dal polo positivo e dunque ha segno *negativo*¹⁴.

Un generatore di corrente invece impone sul suo ramo una corrente fissa

$$i(t) = I \tag{1.4}$$

Nell'analogo idrodinamico, la pompa invece mantiene una determinata portata d'acqua (ossia il prodotto della velocità del liquido per l'area della sezione del mezzo in cui si muove); la velocità nel circuito idrico

¹³Il metodo di risoluzione non verrà discusso in quanto non essenziale per la comprensione dell'attività di laboratorio.

¹⁴Ritornaremo su questo aspetto nell'Esempio 1.

può variare a causa di restringimenti o divisioni del mezzo, ma la portata si conserva complessivamente nel circuito. La differenza di tensione per un solo generatore di corrente in un circuito avente una sola maglia ha segno *negativo*¹⁵.

Da un punto di vista prettamente elettrico, entrambi i generatori forniscono l'energia necessaria ad un circuito per presentare valori non nulli di corrente sui rami e differenze di tensione ai capi dei componenti. La potenza elettrica che forniscono è data dal prodotto

$$P_G(t) = v(t)i(t) \quad (1.5)$$

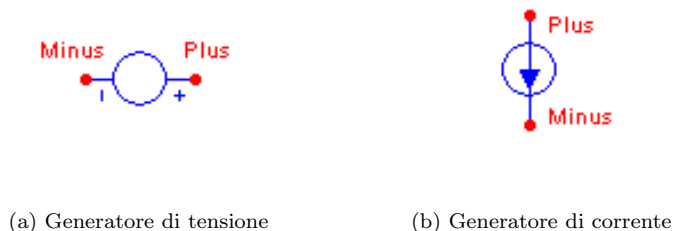


Figura 1.4: Generatore di tensione e generatore di corrente.

1.3 Bipoli utilizzatori

Nella Sezione precedente abbiamo accennato al fatto che un bipolo utilizzatore sfrutta l'energia elettrica fornita da un generatore. In particolare distinguiamo fra bipoli *passivi* quali il *resistore*, che effettivamente dissipa energia elettrica, e bipoli *reattivi*, quali il *condensatore* e l'*induttore*, che assorbono energia elettrica per poi eventualmente emetterne in seguito. Ciò che accomuna i bipoli passivi e reattivi è l'impossibilità di produrre autonomamente energia elettrica, competenza riservata ai bipoli generatori.

Lo studio di resistore, condensatore ed induttore è fondamentale per la comprensione di generici dispositivi elettronici, poichè gli effetti elettrici introdotti da un generico componente possono essere descritti come combinazione degli effetti introdotti dai 3 bipoli sopracitati.

In particolare, i bipoli che introdurremo in questa Sezione sono di tipo:

- *lineare*, in quanto le equazioni differenziali che li caratterizzano sono lineari¹⁶;
- *simmetrico*, in quanto il verso in cui vengono inseriti nel circuito non influenza il comportamento del circuito stesso.

mentre per esempio nel prossimo Capitolo discuteremo del *diodo*, che rappresenta un tipico bipolo non-lineare e asimmetrico.

1.3.1 Il resistore

Il resistore costituisce il bipolo più comunemente presente in un circuito, in quanto rappresenta l'effetto di una perdita di energia elettrica da parte di un conduttore non ideale. La sua grandezza caratteristica è la resistenza, misurata in Ohm (Ω). Ogni ramo di un circuito presenta inevitabilmente una resistenza proporzionale alla sua lunghezza; nell'assunzione di parametri concentrati noi utilizzeremo dei bipoli resistori per indicare la presenza di tali effetti resistivi.

¹⁵Ritorniamo su questo aspetto nell'Esempio 2.

¹⁶Si noti che esistono modelli non-lineari degli stessi componenti, che però per semplicità non tratteremo.



Figura 1.5: Un bipolo resistore.

L'equazione caratteristica di un resistore, detta Legge di Ohm, è data da

$$v(t) = R i(t) \quad (1.6)$$

dove R è il valore della resistenza del bipolo resistore. L'Eq. (1.6) stabilisce che la caduta di tensione ai capi di un resistore è proporzionale alla corrente che l'attraversa, crescente al crescere del valore di R .

La potenza dissipata da un resistore inoltre è data dalla seguente espressione:

$$P_R(t) \triangleq v(t)i(t) = R i^2(t) = \frac{v^2(t)}{R} \quad (1.7)$$

Esercizio 1: *Maglia resistiva con generatore di tensione*

Ora che conosciamo il comportamento dei generatori e dei resistori, siamo finalmente in grado di utilizzare Micro-Cap per costruire il nostro primo circuito funzionante. In questo esempio, per semplicità, il circuito presenterà una sola maglia e verrà costruito utilizzando un solo generatore di tensione ed una sola resistenza. Per questo circuito effettueremo una analisi DC (ovvero in continua).

Per cominciare, creiamo un nuovo file (**File|New**) chiamato `magliaresistivatensione.CIR`.

Il primo passo è introdurre un bipolo generatore di tensione dalla lista di componenti a disposizione, presente nella regione in basso a sinistra. Scegiamolo dalle primitive¹⁷ analogiche, generatori di forme d'onde (**Analog Primitives|Waveform Sources|Voltage Source**). Una volta selezionato, viene visualizzato nell'area **Browse** soprastante, mentre cliccando all'interno della pagina **Main** è possibile istanziarlo nello spazio di lavoro: compare una finestra con tutti i parametri disponibili per caratterizzare il bipolo. Poichè siamo interessati all'analisi DC, definiamo il valore della differenza di tensione fornita dal generatore nel campo DC sotto la scheda **None** in basso: scegliamo 10, dove l'unità del Volt è implicita¹⁸. Diamo invio per accettare le modifiche e completare l'istanziamento.

Ora aggiungiamo un bipolo resistore (**Analog Primitives|Passive Components|Resistor**) posizionandolo a destra del generatore e impostiamo il parametro **Resistance** a 5, dopodichè diamo l'invio per istanziarlo. E' possibile trascinare col mouse i componenti per allinearli o distanziarli opportunamente. Si noti che il valore della resistenza è annotato vicino al componente.

A questo punto dobbiamo creare una maglia con questi due componenti mediante la creazione di interconnessioni fra i loro poli: per fare ciò entriamo in **Wire Mode** (**CTRL+W** oppure il quarto tasto della toolbar direttamente sopra l'area delle pagine) per poter introdurre dei fili di interconnessione. Per collegare due terminali in **Wire Mode** è necessario cliccare il punto di "origine" del filo e rilasciare nel punto di "destinazione". Clicchiamo dunque tra il polo superiore del generatore e il polo superiore del resistore (o viceversa), per poi fare la stessa cosa fra i poli inferiori.

¹⁷Ovvero i componenti astratti generici, non riconducibili ad un design particolare (in quel caso si parla di componenti di libreria).

¹⁸Tutte le comuni sotto/sopra-unità sono utilizzabili aggiungendo il carattere identificativo della sotto/sopra-unità, p.e. **3u** rappresenta 3 micro e **1.2M** rappresenta 1.2 mega, dove l'unità di misura è implicita e dipende dalla grandezza interessata.

Per finire è necessario introdurre un nodo di massa: scegliamo il componente massa (**Analog Components|Connectors|Ground**) ed istanziamolo nel circuito (nessun parametro richiesto). Ricordiamo che possiamo interconnetterlo in un punto arbitrario: la differenza consiste nel fatto che se lo connettiamo al filo superiore i terminali del generatore avranno tensioni 0 V e -10 V (rispettivamente al terminale superiore ed inferiore), se invece lo connettiamo al filo inferiore le tensioni saranno 10 V e 0 V ; scegliamo il secondo caso poichè è più intuitivo. Per questioni prettamente pratiche, ruotiamo il componente istanziato tramite il tasto Rotate della toolbar (**CTRL+R**) fino ad avere il suo unico polo rivolto verso l'alto. Infine trasciniamo il componente fino a far combaciare il suo polo con un punto arbitrario dell'interconnessione inferiore: vediamo che nel punto di contatto si crea un cerchio rosso, il quale indica la presenza di un nodo a più rami. A tale proposito, abilitiamo la voce **Options|View|Node Numbers** per visualizzare i numeri dei nodi, dove il nodo di massa è il nodo 0 e non viene visualizzato.

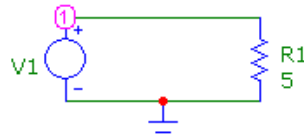


Figura 1.6: Un circuito elementare resistivo con generatore di tensione.

Il circuito, mostrato in Fig. 1.6, è pronto e dunque siamo in grado di effettuare una analisi DC su di esso: dal menu scegliamo **Analysis|DC**. Si aprirà la finestra **DC Analysis Limits** che permette di definire quale segnale deve essere variato in ampiezza e quali segnali vogliamo osservare in uscita. Di base il segnale da variare (presente nell'area **Sweep**) è il generatore **V1**, con un intervallo compreso tra 0 V e il valore nominale da noi scelto, ossia 10 V . Come variabili da osservare vi è solo $v(1)$, ovvero la tensione al nodo 1 (che corrisponde alla differenza di tensione ai capi sia del generatore che del resistore). Per ora accontentiamoci di questa configurazione e premiamo il pulsante **Run** per avviare l'analisi. Si noti che è possibile alterare il circuito senza dover eseguire nuovamente l'analisi, in quanto quest'ultima viene mantenuta aggiornata a fronte di qualunque modifica. Il risultato dell'analisi è un grafico dove in ascissa è presente il segnale variato ed in ordinata $v(1)$; per ovvie ragioni i segnali sono uguali e dunque questo grafico non ci fornisce informazioni molto utili: miglioriamone quindi l'analisi aggiungendo l'osservazione della corrente del componente **R1**.

Per fare ciò torniamo alla configurazione dell'analisi utilizzando il menu della pagina **DC Analysis** e scegliendo **DC|Limits**. Inseriamo gli opportuni campi nella riga sotto quella relativa a $v(1)$: sotto **P** scegliamo **1**, in maniera tale da visualizzare il nuovo segnale nello stesso grafico di $v(1)$; sotto **X Expression** utilizziamo ancora **DCINPUT1**, ovvero il segnale di ingresso variato scelto; sotto **Y Expression** invece usiamo **i(R1)** (per le correnti va specificato il componente invece del nodo). Come **X Range** usiamo gli stessi valori di $v(1)$, espressi nella forma **<Massimo>, <Minimo>, <Passo>**; infine per **Y Range** per il momento usiamo **Auto**. Premiamo nuovamente **Run** e notiamo che la corrente assume valori negativi, il che non ci dice nulla sul verso della corrente se non sappiamo qual è il polo positivo: per visualizzare i nomi dei poli, anzitutto facciamo doppio click sul resistore, dopodichè selezioniamo sotto la regione **Display** il campo **Pin Names**. Diamo invio e vediamo comparire il **Plus** e **Minus**, in particolare con il **Plus** in basso: questo significa che la corrente è supposta diretta dal basso verso l'alto; ma dato che il valore ottenuto dal grafico è negativo, la corrente scorrerà dall'alto verso il basso. Ricordando la discussione della precedente Sezione relativa ai circuiti idrici, il risultato ci conferma che la corrente che attraverso il generatore di tensione esce dal polo positivo¹⁹. Per sistemare il circuito

¹⁹Questo ragionamento vale per un singolo generatore: per esempio, nel caso di due generatori sullo stesso ramo orientati in verso opposto, il verso della corrente dipende dal generatore che fornisce maggiore differenza di potenziale.

e rendere più intuitivi i risultati dell'analisi, provvediamo a spostare fuori dal circuito il resistore, dopodichè lo ruotiamo di 180 gradi e lo inseriamo nuovamente nel circuito. A questo punto ripetiamo l'analisi, con l'unica differenza di scegliere come **Y Range** di $i(R1)$ lo stesso intervallo usato per $v(1)$ (di modo da visualizzare correttamente i risultati): in questo caso vediamo che la corrente è finalmente positiva.

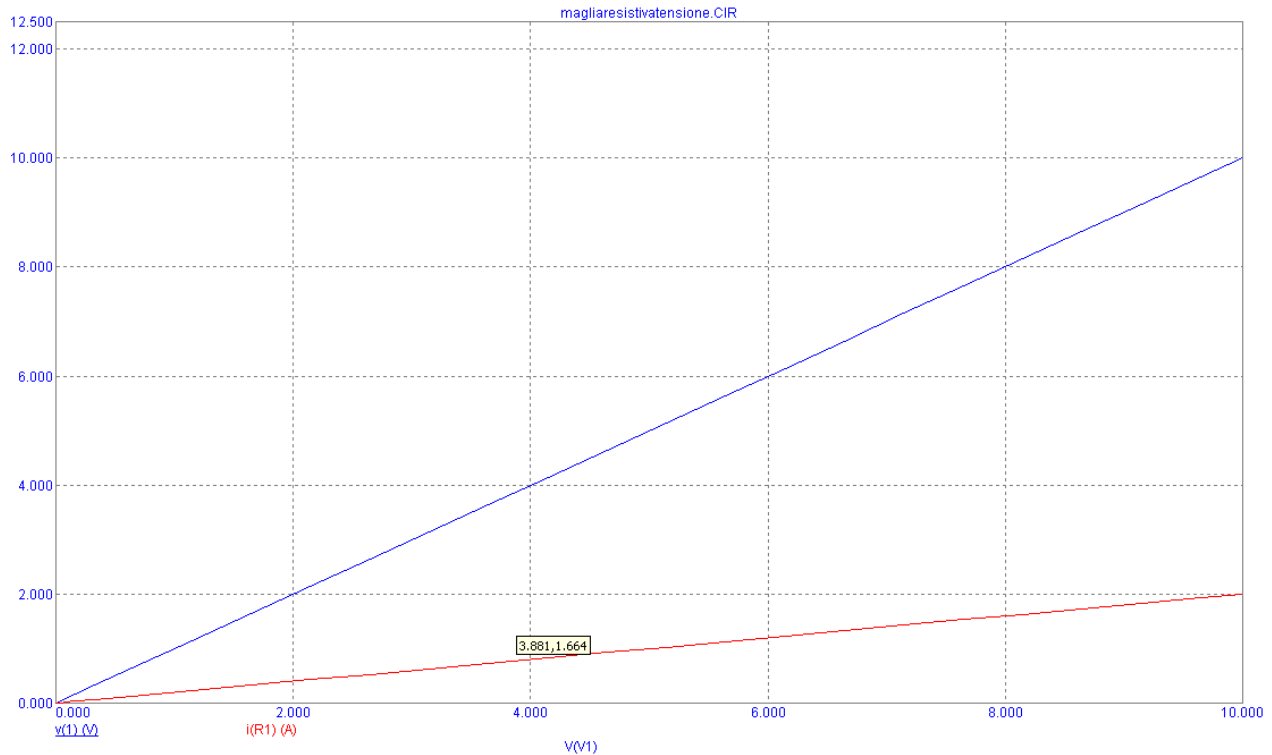


Figura 1.7: Risultato dell'analisi DC del circuito di Fig. 1.6 relativo ad una maglia resistiva con generatore di tensione.

Il suo valore *nominale*²⁰ usando l'Eq. (1.6) è pari al rapporto fra la tensione ai capi del resistore, che è identica a quella ai capi del generatore, e la resistenza, dunque per $V1 = 10\text{ V}$ vale $i(R1) = 2\text{ A}$ (Ampere). Per osservare meglio dal punto di vista grafico tale valore, è consigliabile tarare il passo di **Y Range**, per esempio scegliendolo pari a 2, ottenendo la Fig. 1.7 come risultato finale.

Una alternativa rapida all'analisi grafica è la pagina **Watch**, in cui è possibile inserire espressioni algebriche che coinvolgono correnti e tensioni al fine di ricavare valori numerici. In questo caso tuttavia viene assunto il valore nominale degli ingressi e dunque non è possibile operare con gli intervalli; si noti che i risultati nella pagina **Watch** vengono automaticamente aggiornati ogni volta che si modifica il circuito e si ripete l'analisi. Per ovvie ragioni, la pagina **Watch** è disponibile solamente per l'analisi DC.

Come esempio, proviamo a calcolare la corrente che attraversa il generatore di tensione $i(V1)$: clicchiamo nello spazio sotto la colonna **Expr** e scriviamo $i(V1)$, ottenendo sotto la colonna **Value** il valore -2 , negativo in quanto il verso orario della corrente della maglia fa sì che la corrente del generatore esca dal polo positivo.

²⁰Per valore nominale intendiamo il valore rispetto agli ingressi nominali del circuito, in contrasto con l'intervallo di valori che risulta nell'analisi DC a causa dell'intervallo di ingressi.

Esercizio 2: Maglia resistiva con generatore di corrente

In questo esercizio verificheremo il funzionamento di un circuito alimentato da un generatore di corrente. In particolare, è interessante verificare che se utilizziamo un generatore che eroga corrente di valore pari a quello ricavato nell'Es. 1, allora i segnali osservati $v(1), i(R1)$ hanno lo stesso andamento.

Come primo passo salviamo il precedente file `magliaresistivatensione.CIR` con nuovo nome `magliaresistivacorrente.CIR`. Dopodichè rimuoviamo il generatore di tensione ed istanziamo quello di corrente (`Analog Primitives|Waveform Sources|Current Source`), scegliendo questa volta un valore DC pari a 2. Ruotiamo di 180 gradi il componente, in maniera tale che il verso della corrente del generatore (esplicitato dalla freccia nel componente) sia compatibile con il senso orario che avevamo riscontrato per la corrente nella maglia dell'Es. 1; inseriamo infine il componente nello stesso punto del precedente generatore di tensione, ottenendo il circuito di Fig. 1.8.

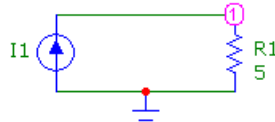


Figura 1.8: Un circuito elementare resistivo con generatore di corrente.

Impostiamo ora l'analisi DC: anzitutto dobbiamo modificare la sorgente di segnale, selezionando `I1` per il campo `Name` della prima variabile nella regione `Sweep`; modifichiamo inoltre il suo `Range` con `2,0,.1`, ovvero fra 0 e 2 con passo di 0.4. Copiamo tale range anche nell'`X Range` dei due segnali osservati $v(1)$ e $i(R1)$, dopodichè facciamo partire l'analisi. Come vediamo dal risultato, mostrato in Fig. 1.9, i valori dei segnali sono equivalenti a quelli presenti in Fig. 1.7, dove ovviamente il segnale di ingresso è differente.

E' possibile infine ricavare con facilità alcune proprietà relative alla composizione di più resistori. Infatti, poichè N resistori in *serie* per costruzione condividono la stessa corrente, utilizzando l'Eq. (1.6) si ottiene

$$R_{ser} = \sum_{n=1}^N R_n \quad (1.8)$$

dove R_{ser} è la resistenza equivalente di un resistore che sostituisce la serie degli N resistori, con la proprietà di presentare stessa differenza di tensione ai capi della serie v_{ser} e stessa corrente i_{ser} . D'altro canto, poichè N resistori in *parallelo* per costruzione condividono la stessa differenza di tensione, si ottiene

$$\frac{1}{R_{par}} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{R_n} \quad (1.9)$$

dove R_{par} è la resistenza di un resistore che sostituisce il parallelo degli N resistori, sempre presentando stessa differenza di tensione v_{par} e stessa corrente totale i_{par} .

Le regole sopracitate consentono, alla rovescia, di determinare la differenza di tensione ai capi di un resistore appartenente ad una serie, oppure la corrente che attraversa un resistore appartenente ad un parallelo. Tali regole sono dette del *partitore resistivo di tensione/corrente*:

$$v_n = \frac{R_n}{R_{ser}} v_{ser} \quad (1.10)$$

$$i_n = \frac{R_{par}}{R_n} i_{par} \quad (1.11)$$

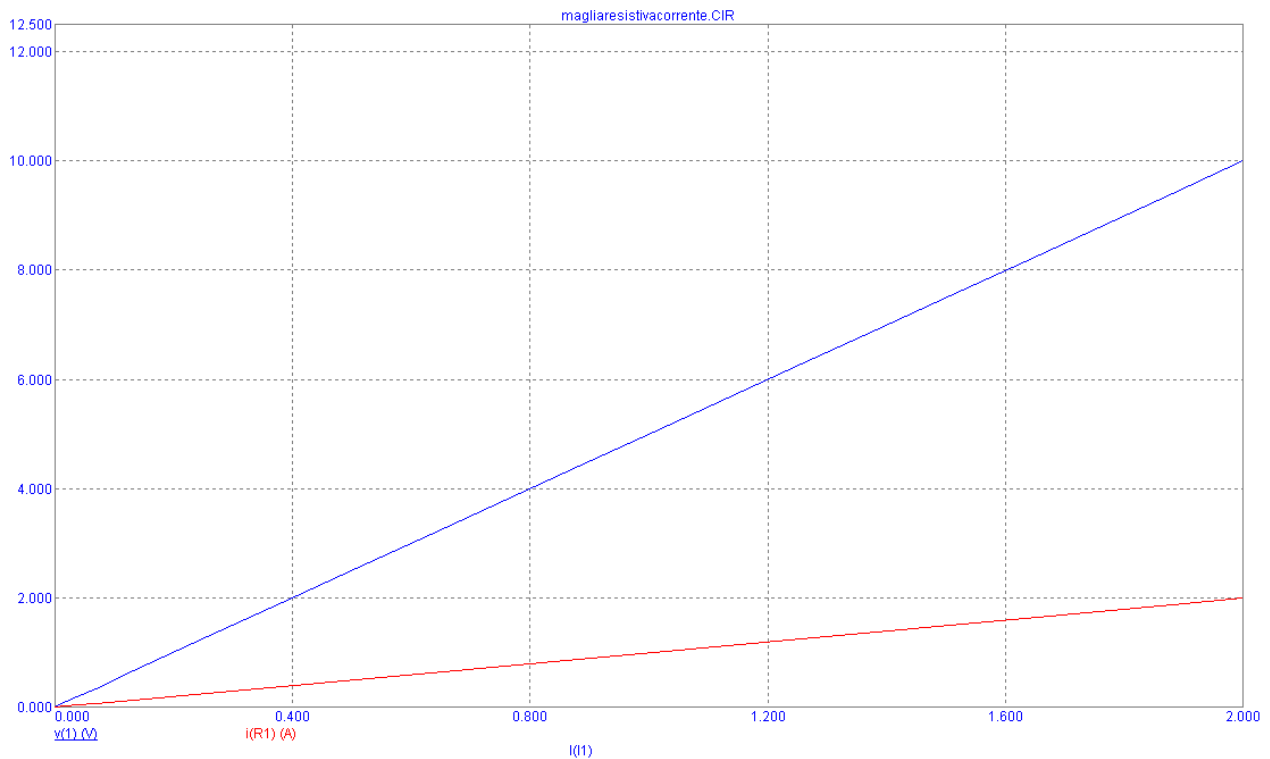


Figura 1.9: Risultato dell'analisi DC del circuito di Fig. 1.8 relativo ad una maglia resistiva con generatore di corrente.

Esercizio 3: Resistori in serie o parallelo

Estendiamo i risultati ottenuti nell'Es. 1 introducendo una serie oppure un parallelo di resistori. Anzitutto apriamo il file `magliaresistivatensione.CIR` e lo salviamo con nuovo nome `resistoriserie.CIR`. Ora rimuoviamo l'interconnessione superiore e istanziamo un nuovo resistore R2 a cui diamo resistenza pari a 15. Ruotiamo il componente in orizzontale, controllando che il polo positivo sia a sinistra, dopodichè colleghiamo direttamente il polo destro di R2 al polo superiore di R1. Si noti come durante queste operazioni i numeri dei nodi vengano continuamente aggiornati. Infine inseriamo un file che collega il polo sinistro di R2 al polo superiore di V1. A questo punto otteniamo il circuito di Fig. 1.10, in cui sono presenti 3 nodi inclusa la massa.

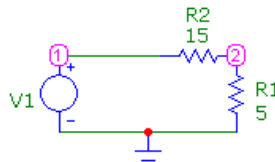


Figura 1.10: Un circuito elementare resistivo con due resistenze in serie.

Nell'analisi di questo circuito quindi può essere interessante osservare anche la tensione al nodo 2: aggiungiamola copiando i campi relativi a $v(1)$ ma utilizzando ovviamente $v(2)$ come **Y Expression**. Il risultato della simulazione ci mostra valori piuttosto bassi per $i(R1)$ e $v(2)$, con conseguente riduzione della leggibilità. Per migliorare l'analisi grafica escludiamo dal grafico

$v(1)$ scegliendo come P il valore 0, dopodichè usiamo 4,0, .5 come Y Range dei segnali restanti.

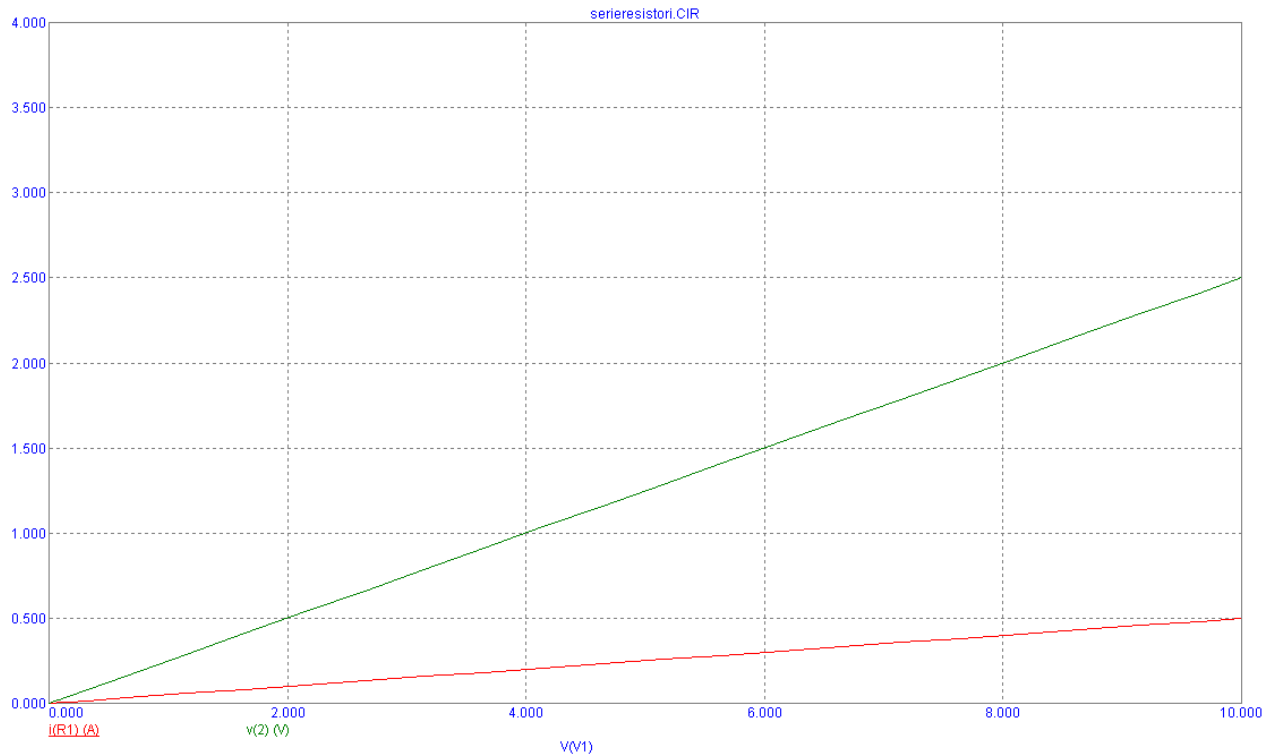


Figura 1.11: Risultato dell'analisi DC del circuito di Fig. 1.10 relativo a resistenze in serie.

Osserviamo dal risultato di Fig. 1.11 che la corrente nominale della maglia si è ridotta fino a 0.5 A, ovvero la stessa corrente $V1/R_{ser}$ che avremmo in presenza di un unico resistore R_{ser} avente secondo l'Eq. (1.8) resistenza pari alla somma delle due resistenze (20Ω). La regola di partitore di tensione data dall'Eq. (1.10) inoltre ci dice che la tensione ai capi di $R1$ è proporzionale alla sua resistenza rispetto alla resistenza totale moltiplicata per la tensione ai capi della serie di resistori, nel nostro caso $\frac{5\Omega}{20\Omega} 10 V = 2.5 V$.

Ora provvediamo a verificare il comportamento di resistori in parallelo. Anzitutto carichiamo il file `magliaresistivatensione.CIR` e lo salviamo con nuovo nome `resistoriparallelo.CIR`. Dopodichè istanziamo un nuovo resistore $R2$ con resistenza pari a 20Ω . Assicurandoci che il polo superiore sia positivo, inseriamo $R2$ a sinistra di $R1$, ottenendo il circuito mostrato in Fig. 1.12. Si noti come in questo caso vi siano solamente due nodi, mentre esistano tre rami.

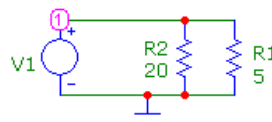


Figura 1.12: Un circuito elementare resistivo con due resistenze in parallelo.

Per analizzare il circuito escludiamo nuovamente $V1$ in quanto poco interessante e introduciamo

$i(R2)$; modifichiamo Y Range a 3,0,.5 per verificare meglio i valori ottenuti. Vediamo dalla Fig. 1.13 che $i(R1)$ è 4 volte $i(R2)$, in conformità all'Eq. (1.11) del partitore di corrente per la quale la corrente in un parallelo si divide in modo inversamente proporzionale ai valori delle resistenze.

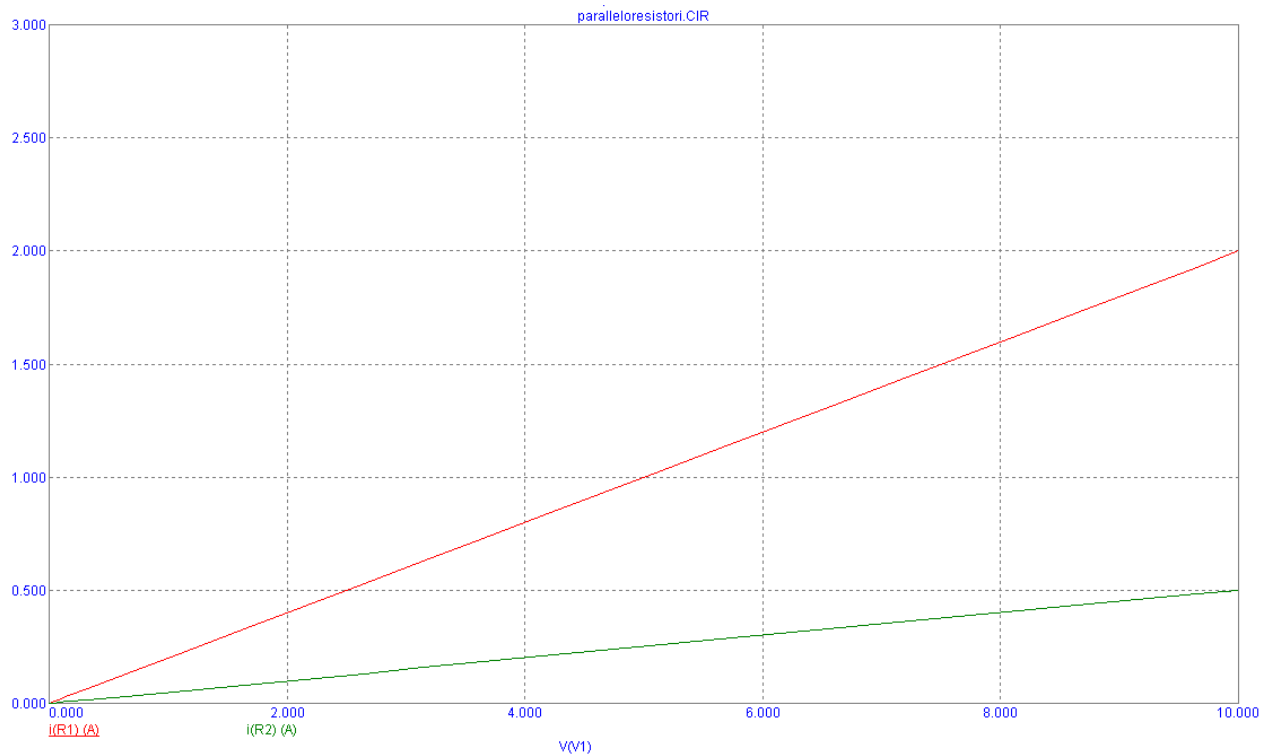


Figura 1.13: Risultato dell'analisi DC del circuito di Fig. 1.12 relativo a resistenze in parallelo.

Naturalmente la corrente su V1 è pari alla somma delle correnti sulle resistenze è dunque pari a 2.5 A, risultato ottenibile anche calcolando $V1/R_{par}$, dove usando l'Eq. (1.9) si ha $R_{par} = 4\Omega$ nel nostro caso.

Infine non verrà effettuata la trattazione dei circuiti resistivi serie/parallelo in presenza di un generatore di corrente, in quanto (come verificato nell'Es. 2) i risultati sono equivalenti se si sostituisce il generatore di tensione con un generatore di corrente che presenta stessa corrente di ramo.

1.3.2 Il condensatore

Il condensatore, mostrato in Fig. 1.14, è un componente circuitale fondamentale qualora si consideri la risposta di un circuito ad una variazione di tensione. Infatti, l'equazione caratteristica del condensatore è data da:

$$i(t) = C v'(t) \quad (1.12)$$

A differenza del caso del resistore, in Eq. (1.12) vediamo che la corrente che attraversa il bipolo è proporzionale alla variazione della tensione ai suoi capi, secondo una costante C chiamata *capacità* del condensatore, espressa in Farad (F). In altri termini, data una variazione di tensione, a capacità maggiore corrisponde corrente maggiore.



Figura 1.14: Un bipolo condensatore.

In particolare, si può facilmente dedurre che in condizioni stazionarie, per le quali non vi è variazione di tensione, la corrente che attraversa un condensatore è nulla e dunque esso si comporta come un *lato aperto virtuale* (dunque è possibile studiare il circuito assumendo che il condensatore non sia presente).

Un'altra differenza rispetto al resistore è data dal fatto che un condensatore non dissipa potenza ma solamente “trattiene” energia data dall'espressione

$$E_C(t) = \frac{1}{2} C v^2(t) \quad (1.13)$$

Questo significa che un condensatore è “scarico” nel momento in cui non vi è differenza di tensione ai suoi capi, mentre è completamente “carico” quando non è attraversato da corrente. Il ruolo di questa energia sarà maggiormente chiaro nella prossima Sezione.

Dal punto di vista fisico, un condensatore rappresenta un “accoppiamento” fra due conduttori posti a distanza ravvicinata: in poche parole, fra due conduttori (aventi diversa tensione) si crea un campo elettrico il quale si oppone alla variazione di tensione fra i due conduttori. Questo significa che un effetto capacitivo è riscontrabile in una certa misura in qualunque circuito elettrico dove siano presenti cariche mobili di segno opposto separate da materiali isolanti, in particolare in fili di interconnessione paralleli ravvicinati. Come si può intuire, lo studio di un circuito reale diventa dunque estremamente complesso qualora si voglia tener conto di tutti i possibili effetti capacitivi fra conduttori.

Esercizio 4: Carica/scarica di un condensatore

In questo esercizio prenderemo in considerazione un cosiddetto *circuito RC-serie*, ovvero caratterizzato da un resistore ed un condensatore in serie.

Come prima cosa carichiamo nuovamente il file `magliaresistivatensione.CIR` e salviamolo con nome `resistorecondensatore.CIR`. Dopodichè eliminiamo l'interconnessione superiore, ruotiamo R1 in orizzontale e lo colleghiamo al polo superiore di V1. Ora introduciamo il componente condensatore (`Analog Primitives|Passive Components|Capacitor`) e come capacità scegliamo `10n`, ovvero 10 nF . Assicurandoci che il polo positivo del condensatore C1 sia in alto, colleghiamo il polo negativo all'interconnessione inferiore, dopodichè con un filo colleghiamo il polo superiore di C1 al polo destro di R1. Otteniamo così il circuito di Fig. 1.15, avente 3 nodi.

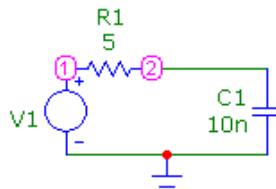


Figura 1.15: Un circuito elementare resistivo-capacitivo.

Ora effettuiamo una analisi DC, in cui aggiungiamo l'osservazione di $v(2)$: dal risultato dell'analisi vediamo che la corrente è nulla mentre $v(2)$ è pari a $v(1)$. Questi valori sono compatibili con la discussione precedente: in continua, in cui le derivate delle tensioni sono nulle, data l'Eq. 1.12 la corrente del condensatore è pari a zero; ne consegue che il condensatore si comporta come un lato aperto, mentre non vi è caduta di tensione ai capi del resistore.

A questo punto spostiamoci all'analisi in transitorio, in cui definiamo una variazione nel tempo della tensione fornita dal generatore. In particolare, andiamo nelle proprietà di V1 e spostiamoci dalla scheda `None` a quella `Pulse`, che permette di definire un andamento impulsivo del segnale; come unica modifica ai valori predefiniti, impostiamo a zero i campi relativi a TR (il tempo di salita) e TF (il tempo di discesa). Dopo queste modifiche, abbiamo che V1 inizia a 0 V, dopo 100 ns sale istantaneamente a 5 V, dopodichè passati ulteriori 400 ns scende istantaneamente a 0 V, rimanendo così fino al tempo finale di 1 μ s. Scegliamo l'analisi di tipo `Transient`, questa volta, ed utilizziamo come segnali $v(1)$, $v(2)$ e $i(R1)$; in particolare, per $i(R1)$ immettiamo in Y Range i valori 1, -1, .5 mentre per gli altri segnali utilizziamo il passo .5.

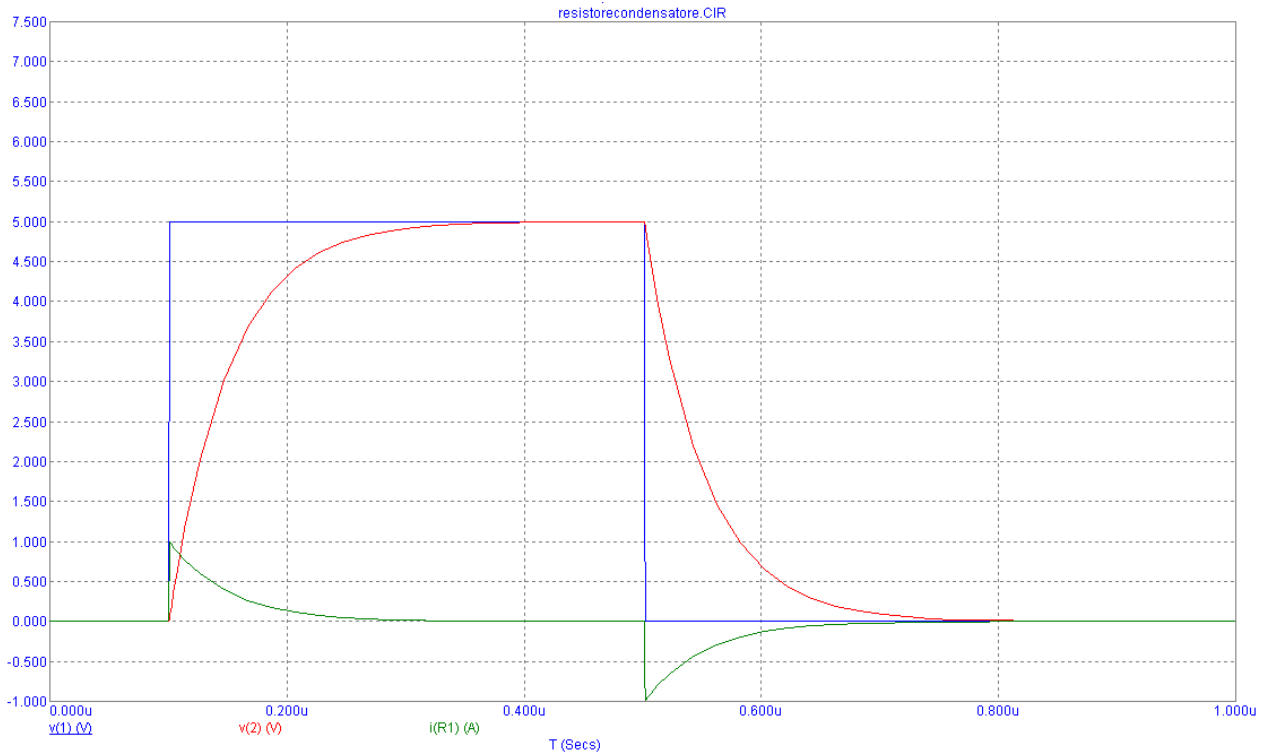


Figura 1.16: Risultato dell'analisi Transient del circuito di Fig. 1.15 relativo ad una serie di resistore e condensatore.

Come è possibile vedere dalla Fig. 1.16, la tensione $v(2)$, corrispondente alla tensione ai capi del condensatore, non segue istantaneamente $v(1)$ quando questa passa da 0 V a 5 V, bensì la raggiunge precisamente dopo un tempo infinito²¹. La corrente $i(R1)$ al contrario sale istantaneamente al valore per $v(1)$ pari a 5 V, ovvero $5\text{ V}/5\ \Omega = 1\text{ A}$, dopodichè essa cala gradualmente secondo l'Eq. 1.12 a causa della riduzione della variazione di tensione ai capi del condensatore. Un istante prima del tempo $T = 500\text{ ns}$ il condensatore è quasi completamente carico ed il circuito è pressochè “a regime”, ossia con un comportamento analogo a quello riscontrato nell'analisi DC in

²¹Il motivo è l'andamento esponenziale dovuto alla risoluzione dell'equazione differenziale di primo grado che caratterizza il circuito.

cui le due tensioni sono uguali e la corrente è nulla. A $T = 500 \text{ ns}$ la tensione ritorna istantaneamente a zero ed abbiamo il comportamento opposto: $v(2)$ inizia a scaricarsi mentre la corrente passa istantaneamente ad un valore uguale in modulo al caso della salita, ma opposta in segno, che si riduce gradualmente fino a raggiungere zero.

E' interessante notare infine come il comportamento percepito di un condensatore dipenda essenzialmente dal valore della capacità: se per esempio quintuplichiamo (temporaneamente, senza salvare il circuito) la capacità, possiamo vedere dall'analisi Transient che $v(2)$ chiaramente non riesce a raggiungere il valore di regime nè nella fase di carica nè in quella di scarica. Nel caso di un segnale periodico, diventa evidente come la carica/scarica di un condensatore avvenga "correttamente"²² solo se la capacità è sufficientemente piccola rispetto al periodo del segnale. Possiamo vedere questo comportamento impostando sotto **Transient Analysis Limits** il campo **Time Range** a **2u** e raddoppiando analogamente il valore massimo degli **X Range** dei segnali: tale risultato è mostrato in Fig. 1.17, dove è evidente l'instaurarsi di un "regime periodico" dei segnali.

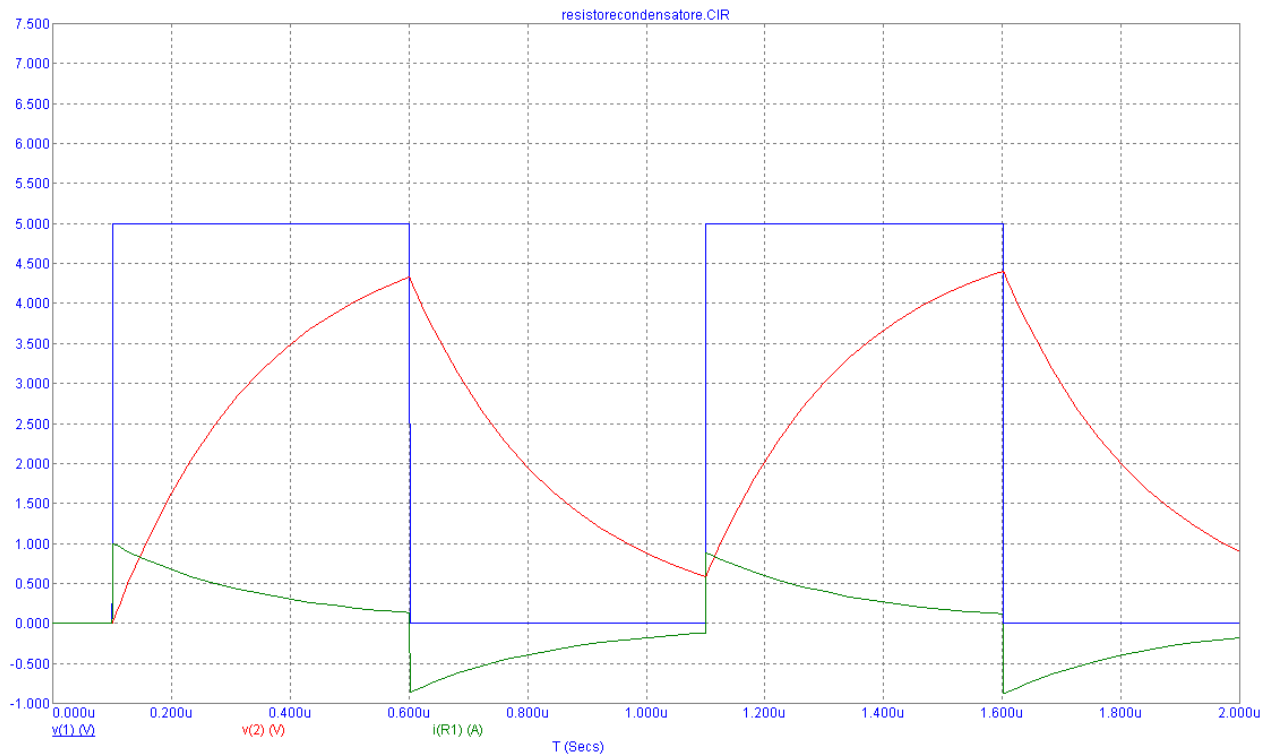


Figura 1.17: Risultato dell'analisi Transient del circuito di Fig. 1.15 per ingresso periodico e alta capacità.

L'effetto mostrato in Fig. 1.17 è centrale nel problema del rapporto tra il livello dei segnali e la frequenza di variazione degli stessi: una frequenza eccessiva può impedire ai segnali elettrici di raggiungere un livello sufficiente da essere interpretati correttamente in digitale. Poichè tutti i circuiti presentano effetti capacitivi, è evidente che uno studio di questi ultimi risulta di primaria importanza per determinare la massima frequenza operativa possibile in un circuito logico.

²²La correttezza dipende dal contesto applicativo e può essere stabilita determinando se il segnale d'uscita raggiunge almeno una data percentuale del segnale di ingresso.

1.3.3 L'induttore

L'induttore, mostrato in Fig. 1.18, è un componente che costituisce il *duale* del condensatore: esso modella la risposta di un circuito ad una variazione di corrente ed è caratterizzato dalla seguente equazione:

$$v(t) = L i'(t) \quad (1.14)$$

dove L è l'*induttanza* del bipolo induttore, espressa in Henry (H).

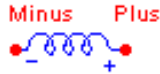


Figura 1.18: Un bipolo induttore.

Mutuando la discussione della precedente Sottosezione, osserviamo che ad induttanza crescente corrisponde maggiore differenza di tensione ai capi dell'induttore. Si noti che, essendo l'induttore un bipolo utilizzatore, ad un incremento di corrente entrante nel polo positivo corrisponde una maggiore *caduta* di tensione ai capi dell'induttore.

In condizioni stazionarie, la differenza di tensione è nulla e dunque l'induttore si comporta da *cortocircuito virtuale* (dunque è possibile studiare il circuito assumendo che l'induttore non sia presente e che i due terminali corrispondenti nel circuito siano direttamente connessi).

Come per il condensatore, l'induttore trattiene energia secondo l'espressione

$$E_L(t) = \frac{1}{2} L i^2(t) \quad (1.15)$$

Questo significa che un induttore è scarico nel momento in cui non è percorso da corrente, mentre è completamente carico quando non presenta differenza di tensione ai suoi capi.

Dal punto di vista fisico, un induttore è sicuramente meno intuitivo di un condensatore: preso un percorso chiuso della corrente in un conduttore, nella regione interna individuata da tale percorso si forma un campo magnetico che si oppone alla variazione di corrente. Questo significa che un effetto induttivo è riscontrabile in una certa misura in qualunque circuito elettrico che presenta interconnessioni metalliche di elevato spessore rispetto alla frequenza dei segnali²³.

Esercizio 5: Carica/scarica di un induttore

In questo esercizio consideriamo un *circuito RL-parallelo*, in cui un resistore ed un induttore sono posti in parallelo, tipicamente utilizzato per verificare il comportamento di carica e scarica di un induttore. Come è possibile immaginare, per dualità i ragionamenti che faremo saranno del tutto analoghi a quelli dell'Es. 4.

Come prima cosa carichiamo nuovamente il file `magliaresistivacorrente.CIR` e salviamolo con nome `resistoreinduttore.CIR`. Dopodichè spostiamo R1 verso sinistra fino ad essere allineato con la massa e cambiamo la sua resistenza a `.5`. Ora introduciamo il componente induttore (`Analog Primitives|Passive Components|Inductor`) e come induttanza scegliamo `20n`, ovvero 20 nH ; a questo punto inseriamo L1 nella precedente posizione di R1, assicurandoci che il polo positivo sia in alto: il circuito ottenuto è mostrato in Fig. 1.19 e presenta 3 rami.

²³Il cosiddetto *effetto pelle* fa sì che, all'aumentare della frequenza, la carica che transita per un conduttore si concentri nella regione superficiale: il risultato è un induttore esteso a tutta l'interconnessione.

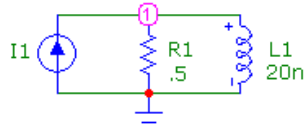


Figura 1.19: Un circuito elementare resistivo-induttivo.

Ora effettuiamo una analisi DC, in cui vogliamo osservare di $v(1)$, $i(L1)$ e $i(I1)$; per ottenere una visualizzazione corretta scegliamo come **Y Range** i valori 3,0,.5. Il risultato dell'analisi mostra che la tensione è nulla mentre $i(L1)$ è pari a $i(I1)$. Anche in questo caso i valori sono compatibili con la discussione precedente: in continua, in cui le derivate delle correnti sono nulle, data l'Eq. 1.14 la differenza di tensione dell'induttore è pari a zero; ne consegue che l'induttore si comporta come un cortocircuito e dunque la corrente del generatore scorre completamente lungo il ramo di L1 mentre $i(R1)$ è nulla.

Passando all'analisi in transitorio, dobbiamo definire una variazione nel tempo della corrente fornita dal generatore. Nelle proprietà di I1 ci spostiamoci alla scheda **Pulse** e impostiamo a zero i campi relativi a TR e TF. Scegliamo l'analisi di tipo **Transient** ed utilizziamo come **Y Range** delle correnti i valori 6,0,.5 mentre per $v(1)$ usiamo 3,-3,.5.

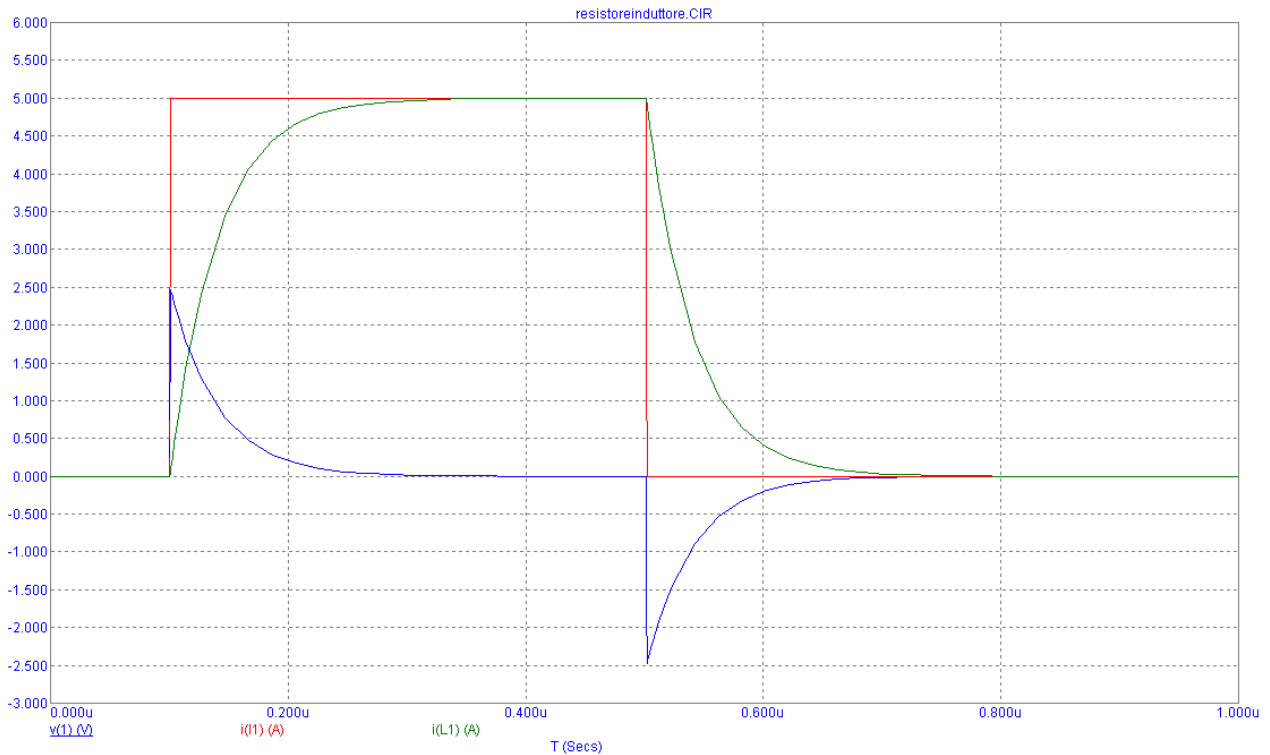


Figura 1.20: Risultato dell'analisi Transient del circuito di Fig. 1.19 relativo ad un parallelo di resistore e induttore.

Come è possibile vedere dalla Fig. 1.20, la corrente $i(L1)$ non segue istantaneamente $i(I1)$ quando questa passa da 0 A a 5 A, bensì la raggiunge precisamente dopo un tempo infinito. La differenza di tensione $v(1)$ al contrario sale istantaneamente al valore per $i(I1)$ pari a 5 A, dopodichè

essa cala gradualmente secondo l'Eq. 1.14 a causa della riduzione della corrente che attraversa l'induttore. Un istante prima del tempo $T = 500\text{ ns}$ l'induttore è quasi completamente carico ed il circuito è pressochè "a regime", ossia con un comportamento analogo a quello riscontrato nell'analisi DC in cui le due correnti sono uguali e la differenza di tensione è nulla. A $T = 500\text{ ns}$ la corrente ritorna istantaneamente a zero ed abbiamo il comportamento opposto: $i(L1)$ inizia a scaricarsi mentre la differenza di tensione passa istantaneamente ad un valore uguale in modulo al caso della salita, ma opposta in segno, che si riduce gradualmente fino a raggiungere zero.

Anche in questo caso il comportamento percepito di un induttore dipende dal valore dell'induttanza: se (temporaneamente) quintuplichiamo l'induttanza e impostiamo sotto **Transient Analysis Limits** il campo **Time Range** a **2u**, raddoppiando analogamente il valore massimo degli **X Range** dei segnali, otteniamo il grafico di Fig. 1.21.

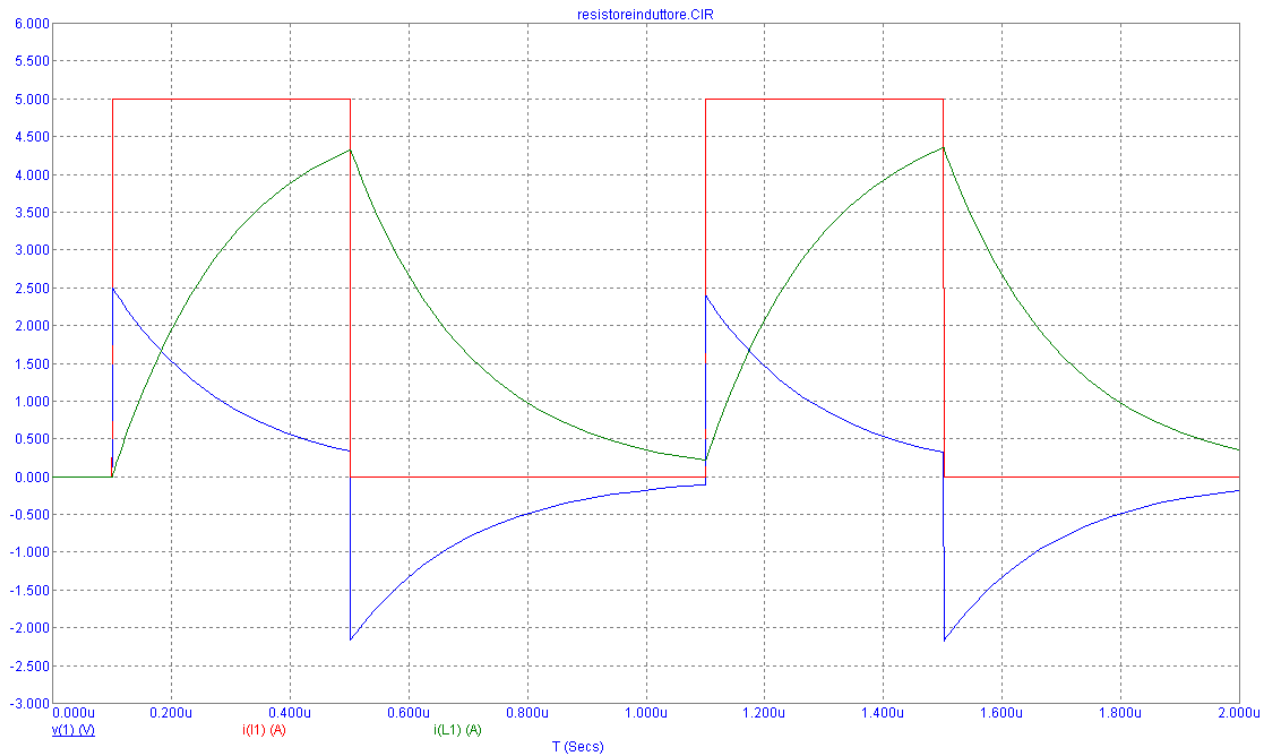


Figura 1.21: Risultato dell'analisi Transient del circuito di Fig. 1.19 per ingresso periodico e alta induttanza.

L'effetto mostrato in Fig. 1.21 è duale a quello discusso nel caso del condensatore, il che significa che gli effetti induttivi vanno necessariamente presi in considerazione per determinare la massima frequenza operativa di un circuito.

1.4 Circuiti di ordine superiore

I circuiti analizzati finora si sono caratterizzati per la presenza di un unico elemento reattivo. Tali circuiti sono definiti circuiti del primo ordine, in quanto le espressioni temporali di tensioni e correnti possono essere definite attraverso equazioni differenziali del primo ordine. Ma cosa succede quando consideriamo circuiti di ordine superiore al primo, ovvero dotati di più componenti reattivi? L'effetto più evidente è dato dalla possibilità che, a fronte di variazioni repentine degli ingressi di corrente o tensione, si presentino oscillazioni

dei segnali di uscita, dovute al trasferimento di energia fra componenti induttive e capacitive. Tali oscillazioni, in ogni caso, verranno progressivamente smorzate a causa della presenza di componenti resistive.

Come precedentemente accennato, in un circuito reale le componenti induttive e capacitive sono distribuite e dunque sempre presenti. Un induttore smorza le variazioni di corrente, mentre un condensatore smorza le variazioni di tensioni. Per osservare l'effetto della presenza di dinamiche di ordine superiore, ritorniamo agli esempi ideali di circuito capacitivo e induttivo visti nella precedente Sezione.

Esercizio 6: *Circuito di secondo ordine in serie*

Per questo esercizio partiamo dai risultati dell'Es. 4, dunque carichiamo il precedente file `resistorecondensatore.CIR` e salviamolo con nome `rlcserie.CIR`.

Come prima operazione eliminiamo l'interconnessione fra `R1` e `C1` ed inseriamo un induttore di induttanza `0n`, per infine collegare con un filo l'induttore al condensatore: otteniamo il circuito *RLC-serie* di Fig. 1.22 in cui evidentemente, come è possibile verificare dall'analisi in transitorio, l'introduzione dell'induttore non ha alcun effetto sul circuito.

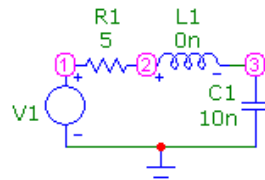


Figura 1.22: Un circuito RLC-serie.

Ora modifichiamo il valore di `L1` scegliendo `50n` e torniamo all'analisi grafica, che mostra il risultato di Fig. 1.23.

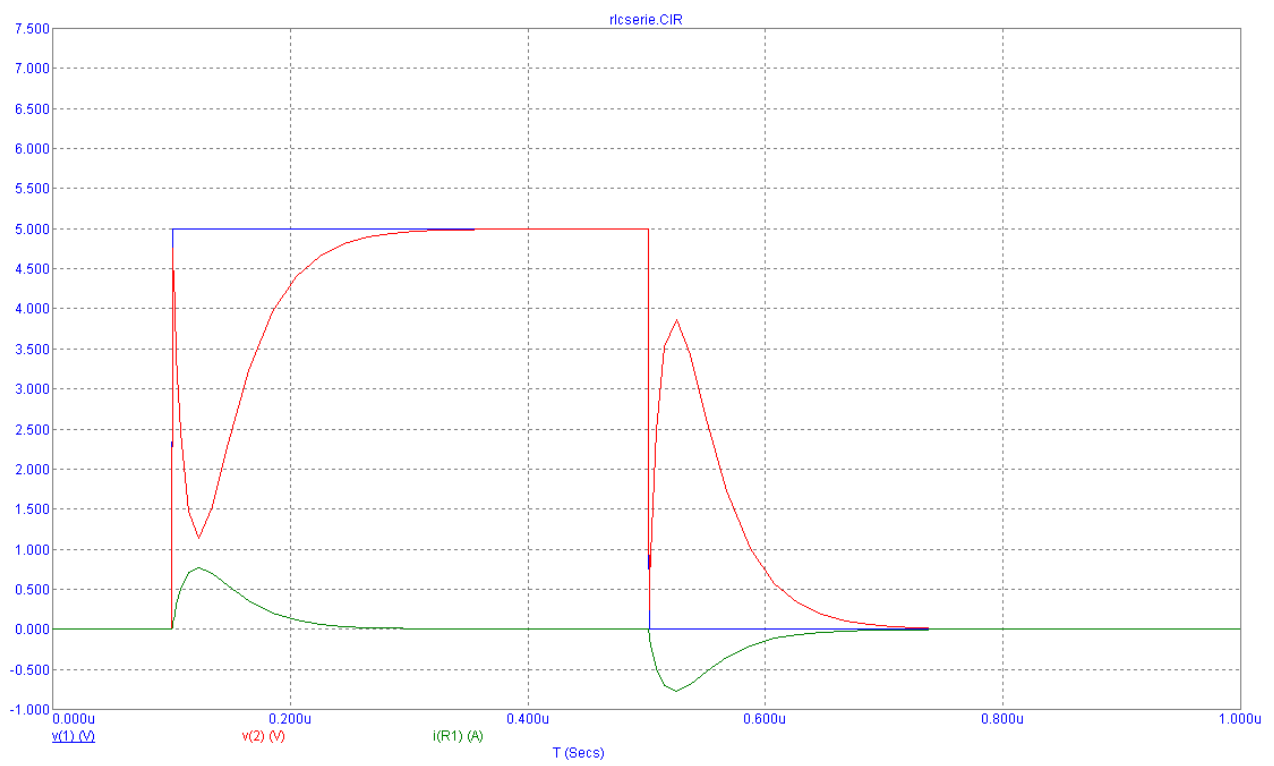


Figura 1.23: Risultato dell'analisi Transient del circuito di Fig. 1.22 relativo a una serie resistore-induttore-condensatore.