

LTspice

Analisi nel dominio della frequenza

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 4-4-2017)

Direttiva .AC

- L'analisi nel dominio della frequenza è attivata mediante la direttiva **.AC** che ha la forma seguente:
.AC tipo n-punti fmin fmax
dove
 - ◆ *tipo* può essere
lin = variazione lineare
oct = variazione per ottave
dec = variazioni per decenni
 - ◆ *n-punti* indica il numero totale di punti nel caso di variazione lineare oppure il numero di punti per ottava o per decade
 - ◆ *fmin* e *fmax* sono le frequenze minima e massima
- In LTspice è possibile utilizzare anche la forma:
.AC list elenco frequenze

Direttiva .AC

- Prima di eseguire l'analisi nel dominio della frequenza il programma esegue automaticamente un'analisi del punto di lavoro in continua (.op)
 - ◆ Se nel circuito sono presenti sia generatori sinusoidali sia generatori in continua, l'analisi in continua viene eseguita azzerando i generatori sinusoidali e l'analisi nel dominio della frequenza è eseguita azzerando i generatori in continua
 - ◆ Se sono presenti componenti non lineari, per eseguire l'analisi nel dominio della frequenza il circuito viene linearizzato nell'intorno del punto di lavoro
 - ◆ I risultati dell'analisi sono significativi se l'approssimazione lineare è accettabile (cioè in **regime di piccoli segnali**)

3

Generatori sinusoidali

- Per assegnare i valori a generatori di tensione o di corrente sinusoidali, occorre
 - ◆ selezionare il pulsante *advanced* nella finestra di dialogo che compare cliccando sul simbolo del componente
 - ◆ inserire i valore dell'ampiezza (in volt o ampere) e della fase (in gradi) nelle caselle *AC Amplitude* e *AC Phase*
 - ◆ si può omettere la fase se il suo valore è zero
- E' possibile assegnare allo stesso generatore sia un valore in continua (utilizzato per l'analisi del punto di lavoro) sia un valore in alternata (usato per l'analisi nel dominio della frequenza)
- Spesso l'analisi nel dominio della viene utilizzata per la determinazione di funzioni di rete
 - ◆ In questo caso normalmente ai generatori si assegna ampiezza unitaria e fase nulla

4

Funzioni di rete

- Si considera un circuito con un solo ingresso (cioè un solo generatore)
- Per **funzione di rete** si intende il rapporto tra il fasore di una variabile (tensione o corrente) di uscita e il fasore della variabile di ingresso (tensione o corrente del generatore)
- Se le variabili di ingresso e di uscita sono relative alla stessa porta la funzione di rete è detta anche **funzione di immettenza** (impedenza o ammettenza)
- Se le variabili di ingresso e di uscita sono relative a porte diverse la funzione di rete è detta **funzione di trasferimento**

5

Funzioni di immettenza

- Per un circuito con un solo ingresso il rapporto tra i fasori della tensione e della corrente del generatore è detto **impedenza di ingresso** (Z_i) e il suo reciproco è detto **ammettenza di ingresso** (Y_i)

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \qquad Y_i = \frac{I_i}{V_i}$$

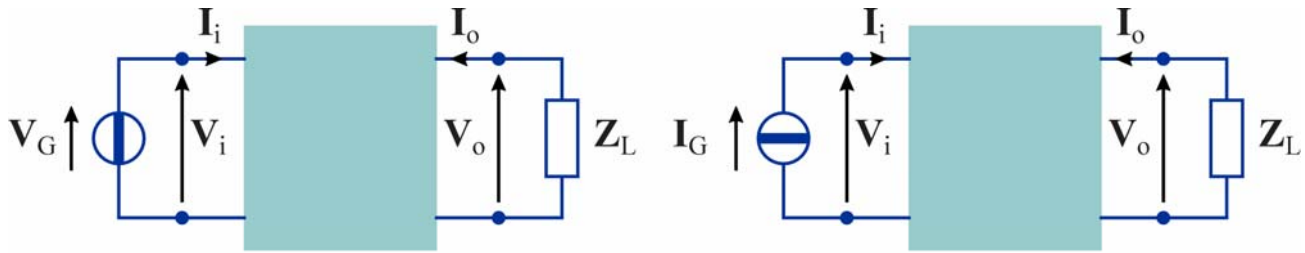
- Nel caso di una rete 2-porte collegata tra un generatore un'impedenza di carico Z_o , si definiscono anche **impedenza di uscita** (Z_o) il rapporto tra i fasori della tensione e della corrente alla porta 2 valutato con il generatore azzerato e **ammettenza di uscita** (Y_o) il suo reciproco

$$Z_o = \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{S_i=0} \qquad Y_o = \left. \frac{I_o}{V_o} \right|_{S_i=0}$$

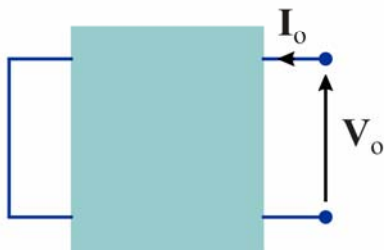
(S_i indica la grandezza impressa, tensione o corrente, del generatore)

6

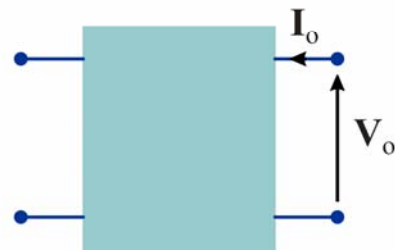
Funzioni di immettenza



Impedenza di ingresso $Z_i = \frac{V_i}{I_i}$



Impedenza di uscita
in cortocircuito $Z_o = \frac{V_o}{I_o} \Big|_{V_G=0}$



Impedenza di uscita
a vuoto $Z_o = \frac{V_o}{I_o} \Big|_{V_G=0}$

7

Funzioni di trasferimento

- In generale, sia l'ingresso che l'uscita possono essere una tensione (V_i , V_o) o una corrente (I_i , I_o)
- ➔ Quindi si possono definire quattro tipi di funzione di trasferimento

- ◆ **Guadagno di tensione**

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

- ◆ **Guadagno di corrente**

$$A_I = \frac{I_o}{I_i}$$

- ◆ **Impedenza di trasferimento**

$$Z_T = \frac{V_o}{I_i}$$

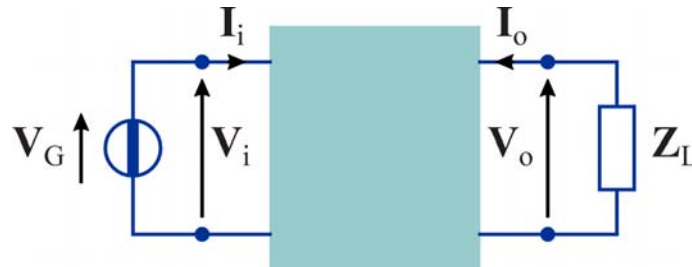
- ◆ **Ammettenza di trasferimento**

$$Y_T = \frac{I_o}{V_i}$$

8

Guadagno di potenza

- Per un due porte collegato tra un generatore e un'impedenza di carico, si definisce **guadagno di potenza** il rapporto tra la potenza attiva ceduta al carico e la potenza attiva fornita dal generatore



$$A_P = \frac{P_L}{P_G} = -\frac{\operatorname{Re}[\mathbf{V}_o \mathbf{I}_o^*]}{\operatorname{Re}[\mathbf{V}_i \mathbf{I}_i^*]}$$

9

Espressione dei guadagni in decibel

- Il **decibel** (dB) è una unità logaritmica convenzionale utilizzata per esprimere il rapporto tra due potenze (es. guadagno di potenza)

$$A_{\text{PdB}} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} A_P$$

- Nel caso di rapporti tra due tensioni o due correnti (es. guadagno di tensione o di corrente) si possono esprimere i valori in dB considerando le potenze che le tensioni o le correnti svilupperebbero se applicate a resistenze di uguale valore

$$A_{\text{VdB}} = 10 \log_{10} \frac{V_2^2 / R}{V_1^2 / R} = 20 \log_{10} \frac{|V_2|}{|V_1|} = 20 \log_{10} |A_V|$$

$$A_{\text{IdB}} = 10 \log_{10} \frac{R I_2^2}{R I_1^2} = 20 \log_{10} \frac{|I_2|}{|I_1|} = 20 \log_{10} |A_I|$$

- ➔ Per i rapporti tra potenze il coefficiente moltiplicativo è 10, per i rapporti tra tensioni o correnti è 20

10

Note

- I valori in decibel sono sempre quantità adimensionali dato che derivano da rapporti tra grandezze omogenee
 - quindi non si utilizzano valori in decibel per le impedenze o le ammettenze di ingresso o di trasferimento
- I valori in decibel dei guadagni forniscono solo le informazioni relative alle ampiezze (le informazioni sulle fasi devono essere indicate a parte)
 - ◆ un valore positivo del guadagno in dB indica che si ha amplificazione
 - ◆ un valore negativo del guadagno in dB indica che il segnale in uscita è attenuato

11

Valori in dB di quantità non adimensionali

- E' possibile esprimere i valori in dB anche di quantità non adimensionali considerando il rapporto con un opportuno valore di riferimento
 - ◆ In questi casi si deve specificare l'unità di misura
- Esempi
 - ◆ dBV (dB Volt) = valore in dB del rapporto tra una tensione e la tensione di riferimento di 1 V

$$V_{\text{dBV}} = 20 \log_{10}(V)$$

- ◆ dBm (dB milliwatt) = valore in dB del rapporto tra una potenza e la potenza di riferimento di 1 mW

$$P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}(P_{\text{mW}}) = 10 \log_{10}(P_{\text{W}}) + 30$$

$$P_{\text{mW}} = 10^{\frac{P_{\text{dBm}}}{10}}$$

12

Visualizzazione dei risultati di un'analisi in frequenza

- In LTspice sono disponibili tre modalità per visualizzare grandezze complesse
 - ◆ **Diagrammi di Bode:** vengono visualizzati il modulo e la fase
 - per il modulo sono disponibili tre opzioni
 - valori in dB
 - valori in scala lineare
 - valori in scala logaritmica
 - ◆ **Diagrammi cartesiani:** vengono visualizzate la parte reale e la parte immaginaria
 - ◆ **Diagrammi di Nyquist:** viene riportata la parte reale sull'asse delle ascisse e la parte immaginaria sull'asse delle ordinate

13

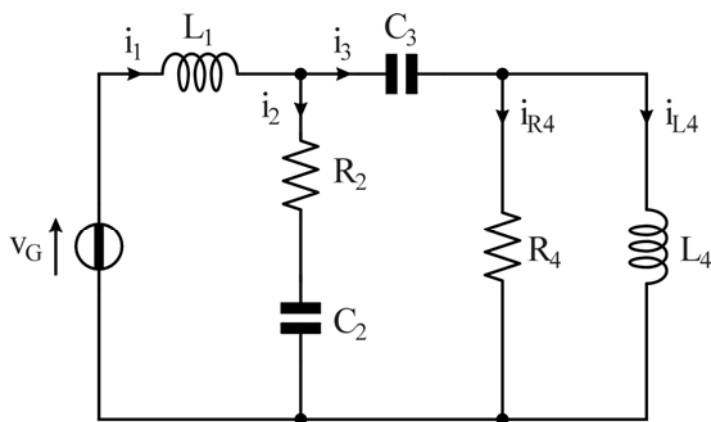
Visualizzazione dei risultati di un'analisi in frequenza

- Nei diagrammi di Bode la rappresentazione della fase è controllata mediante la casella "*Unravel Branch Wrap*"
 - ◆ se la casella non è attivata la fase è rappresentata nell'intervallo tra -180° e $+180^\circ$, quindi in alcuni casi il grafico può risultare discontinuo
 - ◆ se la casella è attivata i valori non sono limitati all'intervallo tra -180° e $+180^\circ$
- Nell'analisi in frequenza non è possibile visualizzare direttamente le potenze come nelle analisi in continua o nel dominio del tempo
- E' comunque possibile ottenere i grafici delle potenze scrivendone le espressioni
 - ◆ Per i numeri complessi sono disponibili le funzioni
 - $\text{Re}(x)$, $\text{Im}(x)$: parte reale e immaginaria di x
 - $\text{Mag}(x)$, $\text{Ph}(x)$: modulo e fase di x
 - $\text{conj}(x)$: coniugato di x

14

Analisi di un circuito in regime sinusoidale

Circuito utilizzato come esempio



$$L_1 = 20 \text{ mH}$$

$$R_2 = 20 \ \Omega \quad C_2 = 25 \ \mu\text{F}$$

$$C_3 = 25 \ \mu\text{F}$$

$$R_4 = 100 \ \Omega \quad L_4 = 50 \text{ mH}$$

$$v_G(t) = 120\sqrt{2} \cos(\omega t + 3\pi/4) \text{ V}$$

$$\omega = 1000 \text{ rad/s}$$

Determinare i fasori delle correnti e delle tensioni dei componenti, le potenze attive e reattive assorbite dalle impedenze, la potenza attiva a reattiva erogata dal generatore

15

Soluzioni

$$\mathbf{I}_1 = 8j \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_2 = -2 + 2j \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_3 = 2 + 6j \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{R4} = -2 + 2j \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{L4} = 4 + 4j \text{ A}$$

$$\mathbf{V}_1 = -160 \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_2 = 40 + 120j \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_{R2} = -40 + 40j \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_{C2} = 80 + 80j \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_3 = 240 - 80j \text{ V}$$

$$\mathbf{V}_4 = -200 + 200j \text{ V}$$

$$P_1 = 0 \text{ W}$$

$$P_2 = 80 \text{ W}$$

$$P_3 = 0 \text{ W}$$

$$P_4 = 400 \text{ W}$$

$$P_G = 480 \text{ W}$$

$$|\mathbf{I}_1| = 8 \text{ A}$$

$$|\mathbf{I}_2| = 2.828 \text{ A}$$

$$|\mathbf{I}_3| = 6.325 \text{ A}$$

$$|\mathbf{I}_{R4}| = 2.828 \text{ A}$$

$$|\mathbf{I}_{L4}| = 5.657 \text{ A}$$

$$|\mathbf{V}_1| = 160 \text{ V}$$

$$|\mathbf{V}_2| = 126.49 \text{ V}$$

$$|\mathbf{V}_{R2}| = 56.57 \text{ V}$$

$$|\mathbf{V}_{C2}| = 113.14 \text{ V}$$

$$|\mathbf{V}_3| = 252.98 \text{ V}$$

$$|\mathbf{V}_4| = 282.84 \text{ V}$$

$$Q_1 = 640 \text{ VAR}$$

$$Q_2 = -160 \text{ VAR}$$

$$Q_3 = -800 \text{ VAR}$$

$$Q_4 = 800 \text{ VAR}$$

$$Q_G = 480 \text{ VAR}$$

$$\arg(\mathbf{I}_1) = 90^\circ$$

$$\arg(\mathbf{I}_2) = 135^\circ$$

$$\arg(\mathbf{I}_3) = 71.57^\circ$$

$$\arg(\mathbf{I}_{R4}) = 135^\circ$$

$$\arg(\mathbf{I}_{L4}) = 45^\circ$$

$$\arg(\mathbf{V}_1) = 180^\circ$$

$$\arg(\mathbf{V}_2) = 71.57^\circ$$

$$\arg(\mathbf{V}_{R2}) = 135^\circ$$

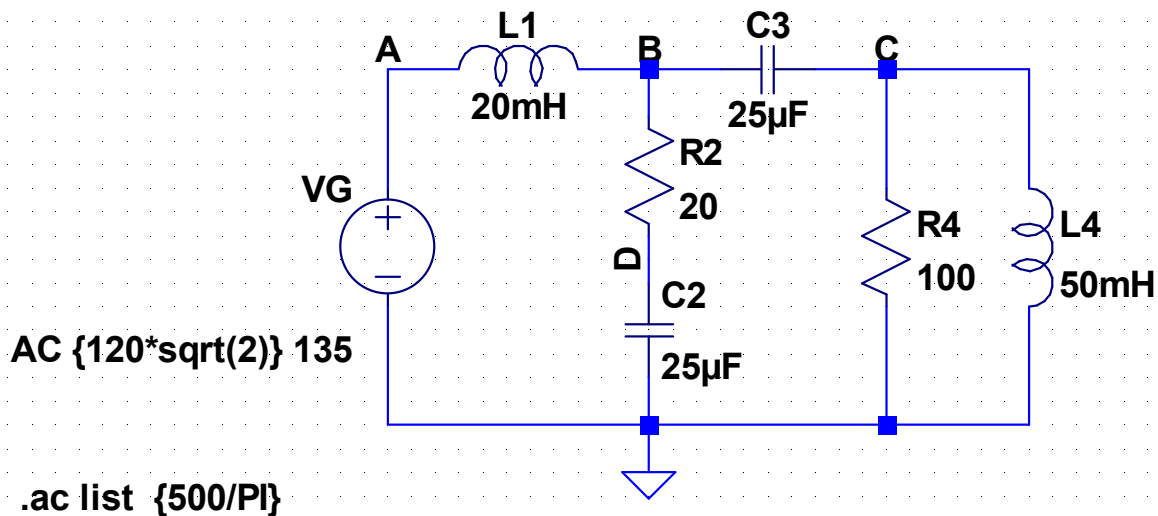
$$\arg(\mathbf{V}_{C2}) = 45^\circ$$

$$\arg(\mathbf{V}_3) = -18.44^\circ$$

$$\arg(\mathbf{V}_4) = 135^\circ$$

16

Analisi di un circuito in regime sinusoidale



Se si assegna una sola frequenza viene visualizzata una tabella contenente i fasori (in modulo e fase) delle tensioni di nodo e delle correnti dei componenti

17

Analisi di un circuito in regime sinusoidale

- Se si assegna una sola frequenza viene generata una tabella contenente le ampiezze e le fasi delle tensioni di nodo e delle correnti dei componenti:

```

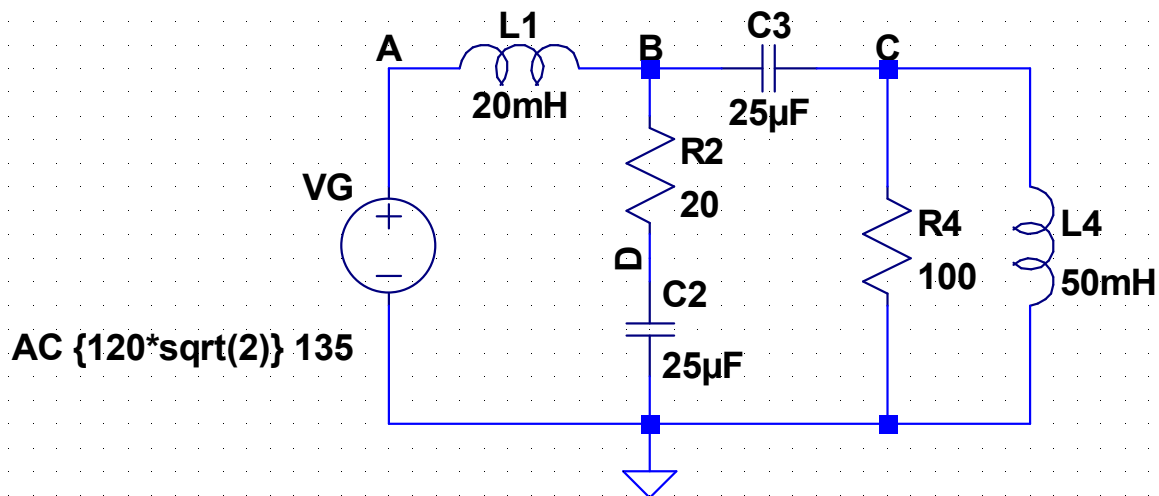
--- AC Analysis ---

frequency:          159.155 Hz
V(a):   mag: 169.706 phase: 135°           voltage
V(b):   mag: 126.49 phase: 71.5662°       voltage
V(d):   mag: 113.136 phase: 45.0011°       voltage
V(c):   mag: 282.832 phase: 135.002°       voltage
I(C3):  mag: 6.32436 phase: 71.568°        device_current
I(C2):  mag: 2.82841 phase: 135.001°       device_current
I(L4):  mag: 5.65664 phase: 45.0032°       device_current
I(L1):  mag: 7.99987 phase: 90.0029°       device_current
I(R4):  mag: 2.82832 phase: 135.002°       device_current
I(R2):  mag: 2.82841 phase: 135.001°       device_current
I(Vg):  mag: 7.99987 phase: -89.9971°     device_current

```

18

Analisi di un circuito in regime sinusoidale



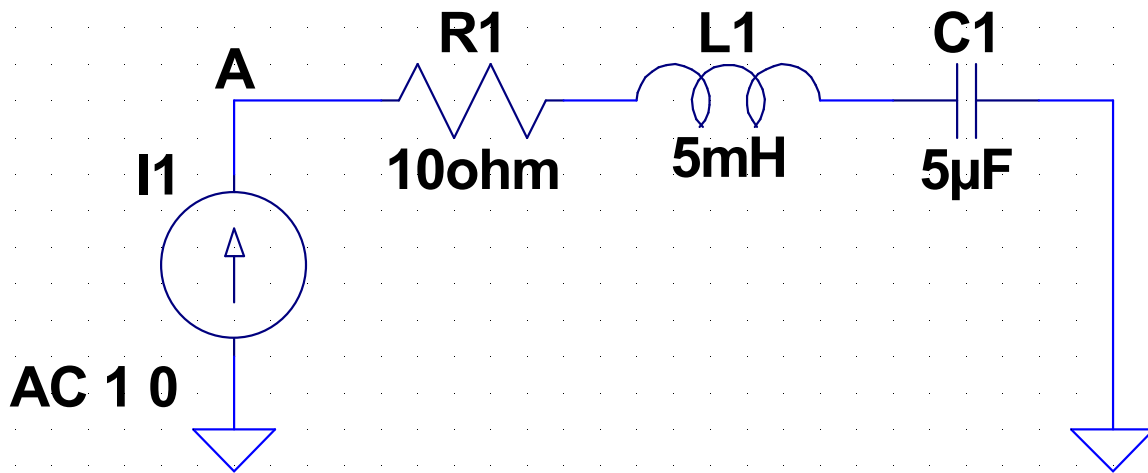
```
.ac list {500/PI} {500/PI+1e-9}
```

Per usare il waveform viewer occorre assegnare più frequenze.
Se interessa simulare il circuito ad una sola frequenza si possono indicare due valori praticamente coincidenti.

Analisi di un circuito in regime sinusoidale

- In questo caso mediante il waveform viewer è possibile visualizzare i fasori delle tensioni e delle correnti
 - ◆ in modulo e fase se si imposta la rappresentazione di tipo Bode (lineare)
 - ◆ in parte reale e immaginaria se si imposta la rappresentazione cartesiana
- Si può visualizzare un'impedenza inserendo come espressione nel waveform viewer il rapporto tra la tensione e la corrente
 - ◆ Per es., per ottenere l'impedenza vista dal generatore ($15+15j \Omega$) inserire $-V(A)/I(VG)$ oppure $V(A)/I(L1)$
- Non è possibile misurare direttamente le potenze, ma si può inserire nel waveform viewer l'espressione della potenza complessa
 - ◆ Per es, per ottenere la potenza complessa erogata dal generatore inserire $-0.5*V(A)*conj(I(VG))$

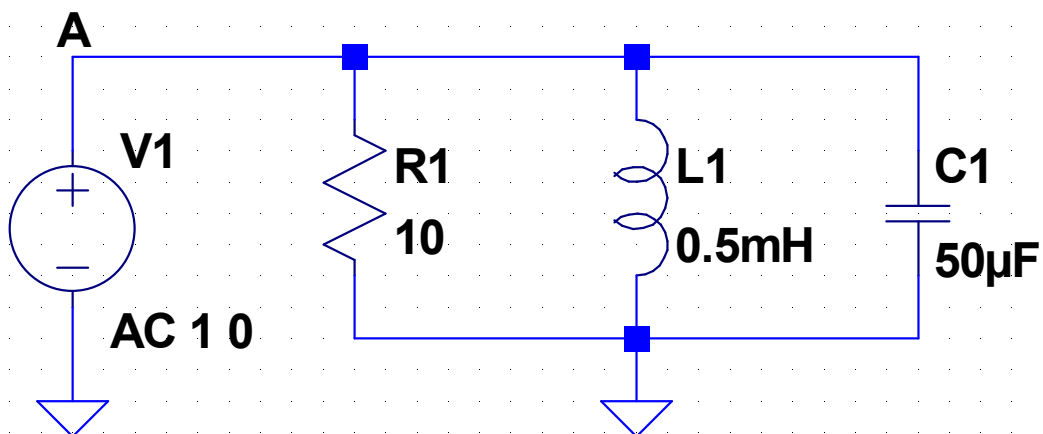
Impedenza di un bipolo RLC serie



.ac lin 500 500Hz 2kHz

V(A) coincide (numericamente) con l'impedenza del bipolo.

Ammettenza di un bipolo RLC parallelo



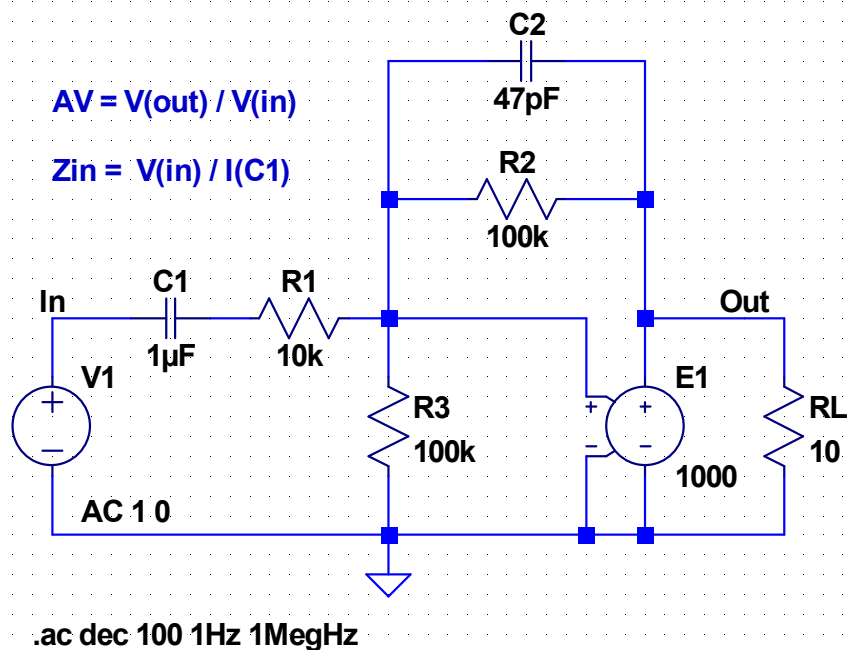
.ac lin 500 500Hz 2kHz

-(V1) coincide (numericamente) con l'ammittenza del bipolo

**Assegnare il valore 0 alla resistenza serie dell'induttore
(il cui valore predefinito è 1 milliohm)**

5-AV-Zin.asc

Calcolo del guadagno di tensione e dell'impedenza di ingresso

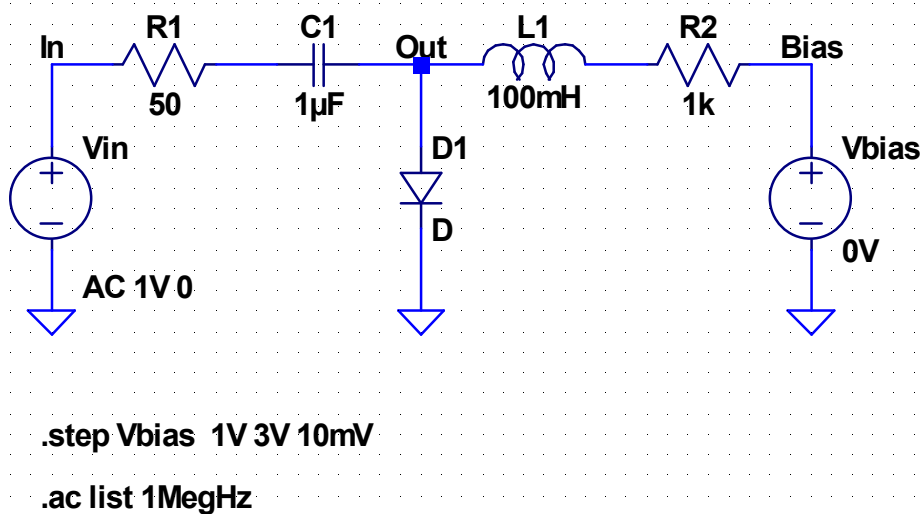


Dato $V_{in} = 1V$, la tensione $V(\text{out})$ numericamente coincide con il guadagno di tensione

23

7-NL-1.asc

Analisi AC di un circuito non lineare

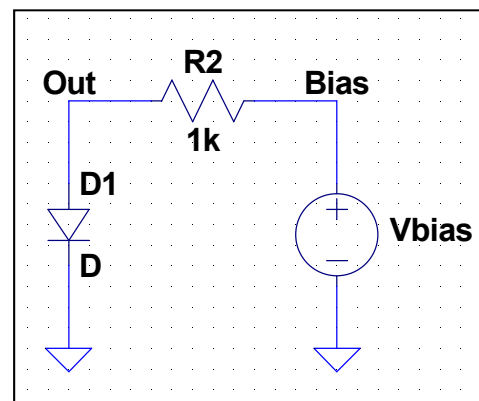


24

Analisi AC di un circuito non lineare

- Il programma esegue inizialmente un'analisi .op per determinare il punto di lavoro
- In questa analisi
 - ◆ il condensatore si comporta come un circuito aperto
 - ◆ l'induttore si comporta come un cortocircuito
- Quindi il circuito si semplifica nel modo seguente

- Il valore della corrente del diodo è fissato dal valore della tensione di polarizzazione V_{bias}



25

Analisi AC di un circuito non lineare

- Nell'analisi AC il diodo viene linearizzato nell'intorno del punto di lavoro, quindi viene rappresentato con una resistenza differenziale

$$r_D = \frac{V_T}{I_D}$$

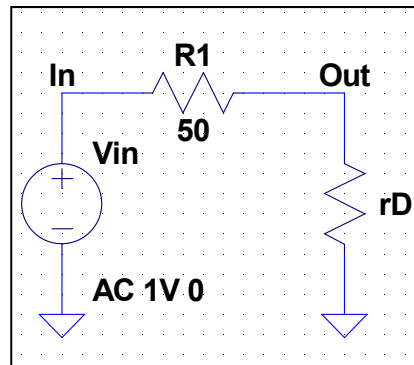
dove I_D è la corrente del diodo nel punto di riposo

- Nell'analisi AC il generatore V_{bias} , per cui non è stato assegnato un valore AC, si comporta come un cortocircuito
- Alla frequenza di 1 MHz
 - ◆ Il condensatore ha un'impedenza molto piccola, quindi si comporta praticamente come un cortocircuito
 - ◆ L'induttore ha un'impedenza molto grande, quindi si comporta praticamente come un circuito aperto

26

Analisi AC di un circuito non lineare

- Dal punto di vista del generatore V_{in} , in circuito si comporta come il seguente



- La tensione V_{out} (che coincide numericamente col guadagno di tensione, dato che $V_{in} = 1V$) è data da

$$v_{out} = v_{in} \frac{r_D}{R_1 + r_D} = v_{in} \frac{\frac{V_T}{I_D}}{R_1 + \frac{V_T}{I_D}} = v_{in} \frac{V_T}{R_1 I_D + V_T}$$

27

Analisi AC di un circuito non lineare

- Come verifica, è possibile ottenere il risultato precedente eliminando il generatore AC e facendo una serie di analisi .op del circuito
- Per visualizzare il guadagno di tensione per piccoli segnali si può inserire nel waveform viewer la sua espressione in funzione di I_D

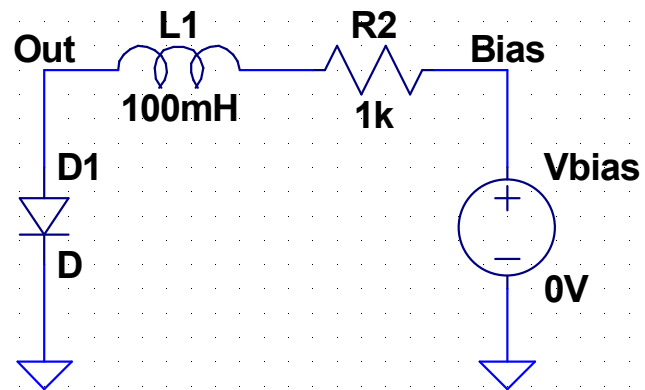
$$A_V = \frac{V_T}{R_1 I_D + V_T}$$

che, con i valori considerati nell'esempio diviene:

$$26m / (50 * I(D1) + 26m)$$

28

**Analisi AC di un circuito non lineare
Determinazione del punto di lavoro**



.op

.step Vbias 1V 3V 10mV

**E' possibile visualizzare il guadagno per piccoli segnali
inserendo l'espressione: $26m/(26m+50*I(D1))$**