

# Teoremi dei circuiti

[www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm](http://www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm)  
(versione del 12-3-2014)

## Teorema di Tellegen

- **Ipotesi:**

- ◆ Circuito con  $n$  nodi e  $l$  lati
- ◆ Versi di riferimento scelti per tutti i lati secondo la convenzione dell'utilizzatore
- ◆  $\{v_1, \dots, v_l\}$  = insieme di tensioni che soddisfano la LKV per il circuito considerato
- ◆  $\{i_1, \dots, i_l\}$  = insieme di correnti che soddisfano la LKI per il circuito considerato

➔ La somma estesa a tutti i lati del circuito dei prodotti  $v_k i_k$  è nulla

$$\sum_{k=1}^l v_k i_k = 0$$

## Teorema di Tellegen – Dimostrazione (1)

- Le tensioni dei lati soddisfano la LKV
  - ➔ possono essere espresse come differenze tra tensioni di nodo (rispetto ad un nodo di riferimento arbitrario)
- Si indica con  $i_{PQ} = -i_{QP}$  la corrente totale dei lati che collegano il nodo P al nodo Q (diretta da P a Q)
  - ◆ se non c'è nessun lato tra i nodi P e Q ➔  $i_{PQ} = 0$
  - ◆ se c'è un solo lato  $k$  che collega i nodi P e Q
    - se il lato va da P a Q ➔  $v_k i_k = (v_P - v_Q) i_{PQ}$
    - se il lato va da Q a P ➔  $v_k i_k = (v_Q - v_P) i_{QP} = (v_P - v_Q) i_{PQ}$
  - ◆ se ci sono più lati che collegano i nodi P e Q
    - ➔ il prodotto  $(v_P - v_Q) i_{PQ}$  rappresenta la somma dei prodotti  $v_k i_k$  estesa a tutti questi lati

3

## Teorema di Tellegen – Dimostrazione (2)

➔ Quindi si ha

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^l v_k i_k &= \frac{1}{2} \sum_{P=0}^{n-1} \sum_{Q=0}^{n-1} (v_P - v_Q) i_{PQ} = \frac{1}{2} \sum_{P=0}^{n-1} \sum_{Q=0}^{n-1} (v_P i_{PQ} + v_Q i_{QP}) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{P=0}^{n-1} v_P \underbrace{\left( \sum_{Q=0}^{n-1} i_{PQ} \right)}_{=0} + \frac{1}{2} \sum_{Q=0}^{n-1} v_Q \underbrace{\left( \sum_{P=0}^{n-1} i_{QP} \right)}_{=0} = 0\end{aligned}$$

- ◆ I fattori  $\frac{1}{2}$  derivano dal fatto che, se i nodi P e Q variano su tutto l'insieme dei nodi del circuito, ogni lato viene contato due volte
- ◆ Le sommatorie tra parentesi sono nulle perché rappresentano rispettivamente la corrente totale uscente dal nodo P e dal nodo Q (e le correnti dei lati per ipotesi soddisfano la LKI)

4

## Teorema di Tellegen - Note

- Il teorema richiede solo che le tensioni e le correnti dei lati soddisfino le leggi di Kirchhoff, non è necessario che soddisfino anche le equazioni dei componenti
- Se le tensioni e le correnti soddisfano anche le equazioni dei componenti i prodotti  $v_k i_k$  rappresentano le potenze assorbite
  - ➔ La somma delle potenze assorbite dai componenti di un circuito è nulla
  - ◆ Si indica con  $\mathcal{K}_G$  l'insieme dei valori di  $k$  per i quali il lato  $k$  è un generatore

$$-\sum_{k \in \mathcal{K}_G} v_k i_k = \sum_{k \notin \mathcal{K}_G} v_k i_k$$

- ➔ La potenza complessivamente erogata dai generatori è uguale alla somma delle potenze assorbite dagli altri componenti

5

## Teorema di sostituzione

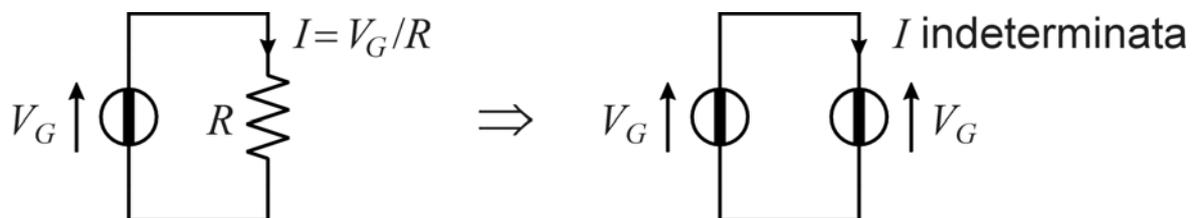
- **Ipotesi:**
  - ◆ Circuito con  $l$  lati
  - ◆ Unica soluzione  $v_k = v_{k0}$   $i_k = i_{k0}$  ( $k = 1, \dots, l$ )
  - ◆ Il lato  $h$  corrisponde a un bipolo
  - ◆ **Caso a)**: Il circuito che si ottiene sostituendo il lato  $h$  con un generatore di tensione  $v_{h0}$  ammette un'unica soluzione
  - ◆ **Caso b)**: Il circuito che si ottiene sostituendo il lato  $h$  con un generatore di corrente  $i_{h0}$  ammette un'unica soluzione
- ➔ Sia nel caso a) sia nel caso b) la soluzione del circuito con il generatore al posto del lato  $h$  coincide con la soluzione del circuito originale
- **Dimostrazione:** è immediato verificare che la soluzione del circuito originale soddisfa anche le equazioni dei circuiti modificati a) e b)
  - ◆ le equazioni dei collegamenti dei due circuiti coincidono
  - ◆ la corrente (caso a) o la tensione (caso b) del lato  $h$  è compatibile con il generatore che sostituisce il lato stesso

6

## Teorema di sostituzione - Nota

- Il teorema si può applicare solo se il circuito ottenuto sostituendo il lato  $h$  con un generatore ammette una e una sola soluzione
- In alcuni casi la sostituzione di un lato con un generatore può dare origine a circuiti impossibili o indeterminati

### Esempio



7

## Teorema di sovrapposizione

- **Ipotesi:** circuito formato da componenti lineari resistivi e da
  - ◆  $N_V$  generatori indipendenti di tensione  $v_{G1}, \dots, v_{GN_V}$
  - ◆  $N_I$  generatori indipendenti di corrente  $i_{G1}, \dots, i_{GN_I}$
- ➔ La tensione e la corrente del generico lato  $h$  sono combinazioni lineari delle tensioni e delle correnti impresse dei generatori indipendenti

$$v_h = \sum_{k=1}^{N_V} \alpha_{hk} v_{Gk} + \sum_{k=1}^{N_I} r_{hk} i_{Gk}$$

$$i_h = \sum_{k=1}^{N_V} g_{hk} v_{Gk} + \sum_{k=1}^{N_I} \beta_{hk} i_{Gk}$$

- **Dimostrazione:** la proprietà è diretta conseguenza del fatto che le tensioni e le correnti dei lati sono la soluzione di un sistema di equazioni lineari algebriche nel quale le tensioni e le correnti impresse dei generatori costituiscono i termini noti

8

## Coefficients di rete

- I coefficienti delle combinazioni sono detti **coefficienti di rete**
- I coefficienti di rete non dipendono dalle tensioni e correnti dei generatori indipendenti, ma solo dai parametri degli altri componenti

$$\alpha_{hk} = \frac{v_h}{v_{Gk}} \bigg|_{\substack{v_{Gj}=0 \forall j \neq k \\ i_{Gj}=0 \forall j}}$$

**guadagno di tensione**

$$r_{hk} = \frac{v_h}{i_{Gk}} \bigg|_{\substack{v_{Gj}=0 \forall j \\ i_{Gj}=0 \forall j \neq k}}$$

**resistenza di ingresso** ( $h = k$ )  
**resistenza di trasferimento** ( $h \neq k$ )

$$g_{hk} = \frac{i_h}{v_{Gk}} \bigg|_{\substack{v_{Gj}=0 \forall j \neq k \\ i_{Gj}=0 \forall j}}$$

**conduttanza di ingresso** ( $h = k$ )  
**conduttanza di trasferimento** ( $h \neq k$ )

$$\beta_{hk} = \frac{i_h}{i_{Gk}} \bigg|_{\substack{v_{Gj}=0 \forall j \\ i_{Gj}=0 \forall j \neq k}}$$

**guadagno di corrente**

9

## Sovrapposizione degli effetti

- Ciascuno dei termini delle sommatorie rappresenta il valore che assume la tensione  $v_h$  o la corrente  $i_h$  se nel circuito agisce un solo generatore indipendente e tutti gli altri sono *spenti* (cioè le loro tensioni o correnti sono azzerate)

$$v_h = \sum_{k=1}^{N_V} \alpha_{hk} v_{Gk} + \sum_{k=1}^{N_I} r_{hk} i_{Gk}$$

$$i_h = \sum_{k=1}^{N_V} g_{hk} v_{Gk} + \sum_{k=1}^{N_I} \beta_{hk} i_{Gk}$$

- ➔ *Le tensioni e le correnti possono essere ottenute sovrapponendo gli effetti prodotti dai singoli generatori indipendenti*

10

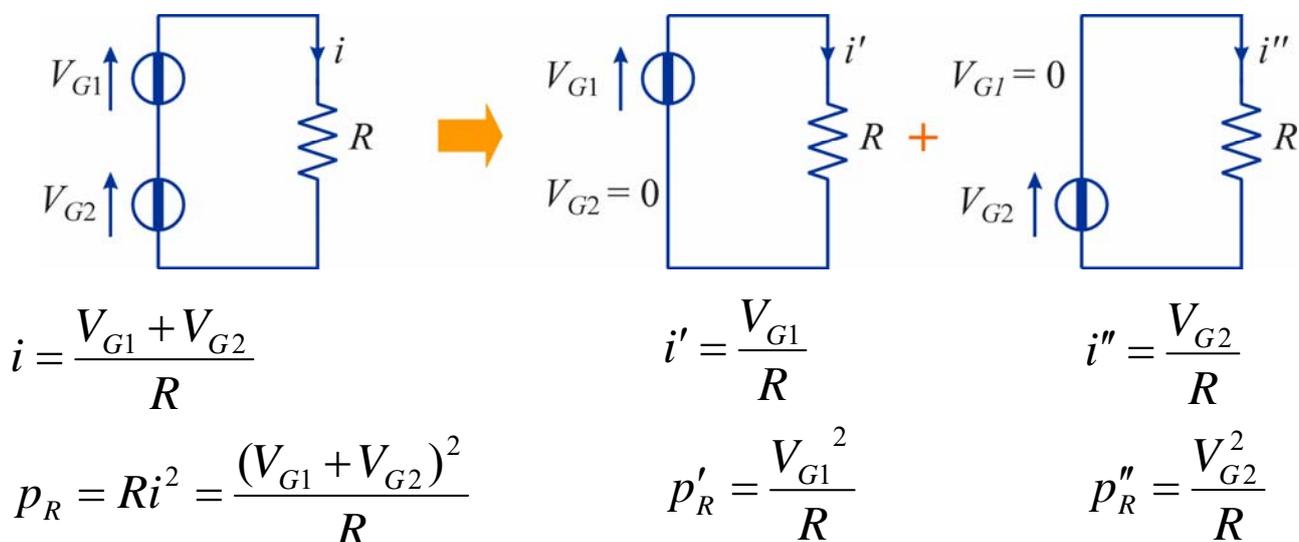
## Analisi mediante sovrapposizione degli effetti

- L'analisi di un circuito con più generatori indipendenti può essere eseguita studiando i tutti i circuiti che si ottengono mantenendo un solo generatore volta e azzerando i rimanenti
  - ◆ *Spegnere un generatore indipendente di tensione corrisponde a sostituirlo con un cortocircuito*
  - ◆ *Spegnere un generatore indipendente di corrente corrisponde a sostituirlo con un circuito aperto*
- La soluzione del circuito è ottenuta sommando i contributi dei singoli generatori (se in tutte le fasi della risoluzione si mantengono gli stessi versi di riferimento)
- Il procedimento è conveniente quando i circuiti con un solo generatore hanno struttura più semplice rispetto al circuito completo
- In alcuni casi può essere conveniente dividere i generatori in gruppi, invece che considerarli singolarmente

11

## Teorema di sovrapposizione e potenza

- Il teorema di sovrapposizione **non vale** per le potenze, legate da relazioni non lineari alle tensioni e alle correnti dei generatori



$$i = i' + i'' \quad p_R \neq p'_R + p''_R$$

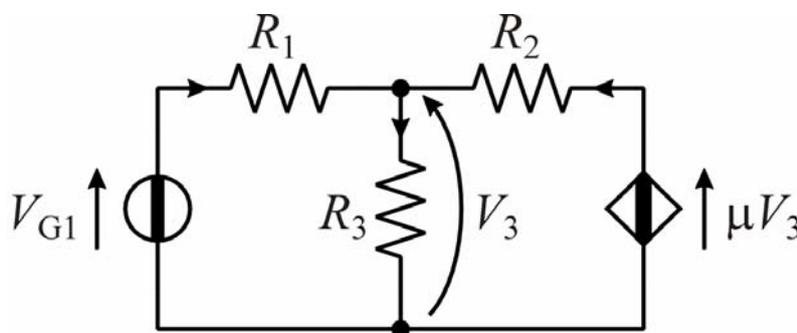
12

## Teorema di sovrapposizione e generatori dipendenti

- Il teorema di sovrapposizione non riguarda i generatori dipendenti dato che le loro tensioni o correnti non sono termini noti delle equazioni del circuito
- E' comunque possibile utilizzare il teorema di sovrapposizione per risolvere circuiti con generatori dipendenti mediante il seguente procedimento:
  - ◆ Si sostituiscono i generatori dipendenti con generatori indipendenti di valore incognito
  - ◆ Mediante sovrapposizione, si determinano le tensioni o le correnti che controllano i generatori (**variabili di controllo**) in funzione delle tensioni o correnti incognite dei generatori (**variabili controllate**)
  - ◆ Si sostituiscono alle variabili controllate le loro espressioni in funzione delle variabili di controllo
  - ◆ In questo modo si ottengono delle equazioni in cui compaiono come incognite le sole variabili di controllo
  - ◆ Note le variabili di controllo, e quindi anche quelle controllate, si determinano le rimanenti tensioni e correnti

13

### Esempio (1)



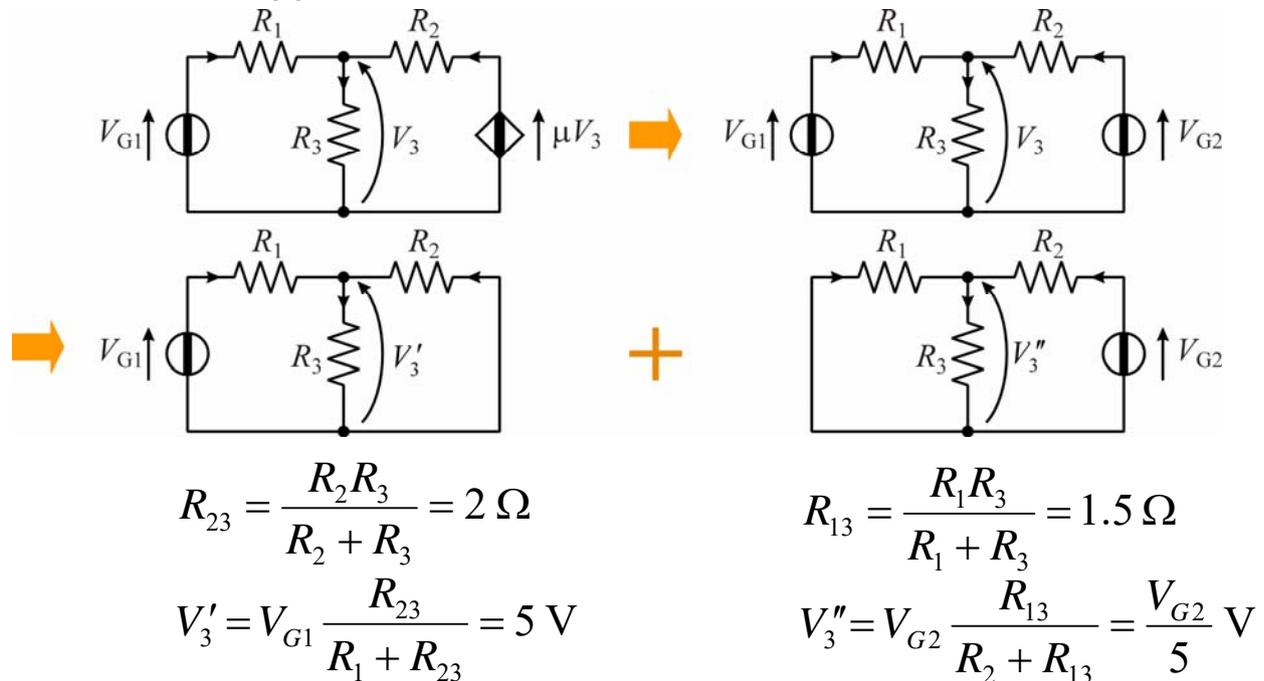
$$\begin{aligned}R_1 &= 2 \Omega \\R_2 &= 3 \Omega \\R_3 &= 6 \Omega \\V_{G1} &= 10 \text{ V} \\ \mu &= 2\end{aligned}$$

Determinare le correnti nei resistori.

14

## Esempio (2)

- Si sostituisce il generatore dipendente con un generatore indipendente di tensione incognita  $V_{G2}$  e si calcola la variabile di controllo  $V_3$  mediante sovrapposizione.



15

## Esempio (3)

- Sommando i contributi dei due generatori e sostituendo a  $V_{G2}$  la sua espressione in funzione della variabile di controllo  $V_3$  si ottiene un'equazione nell'incognita  $V_3$

$$\left. \begin{aligned} V_3 = V_3' + V_3'' = 5 + \frac{V_{G2}}{5} \\ V_{G2} = \mu V_3 = 2V_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_3 = 5 + \frac{2}{5} V_3 \Rightarrow V_3 = 15 \text{ V}$$

- Nota  $V_3$  si possono determinare le correnti nei resistori

$$I_1 = \frac{V_{G1} - V_3}{R_1} = -2.5 \text{ A}$$

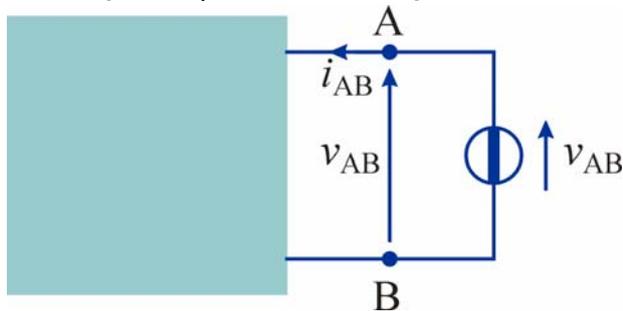
$$I_2 = \frac{V_{G2} - V_3}{R_2} = \frac{(\mu - 1)V_3}{R_2} = 5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = 2.5 \text{ A}$$

16

## Resistenza equivalente (1)

- Si consideri un bipolo A-B formato da componenti lineari (non contenente generatori indipendenti)
- Se il bipolo è comandato in tensione è possibile collegare ai suoi terminali un generatore indipendente di tensione
- Il circuito così ottenuto è lineare
  - ➔ la corrente entrante nel bipolo risulta proporzionale alla tensione del generatore indipendente
  - ➔ *il bipolo è equivalente a un resistore*
- La costante di proporzionalità rappresenta la conduttanza equivalente del bipolo (e il suo reciproco la resistenza equivalente)



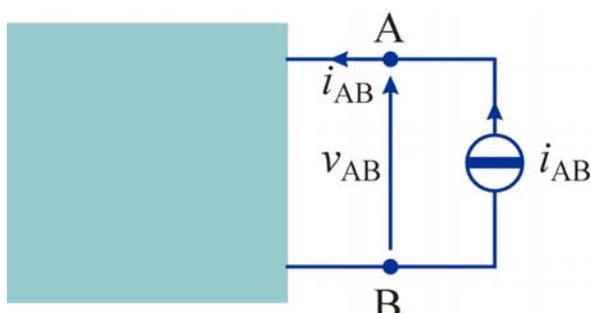
$$G_{eq} = \frac{i_{AB}}{v_{AB}}$$

$$R_{eq} = \frac{v_{AB}}{i_{AB}}$$

17

## Resistenza equivalente (2)

- Se il bipolo A-B è comandato in corrente è possibile collegare ai suoi terminali un generatore indipendente di corrente
- Dato che il circuito è lineare, la tensione ai terminali del bipolo risulta proporzionale alla corrente del generatore indipendente
- La costante di proporzionalità rappresenta la resistenza equivalente del bipolo (e il suo reciproco la conduttanza equivalente)



$$R_{eq} = \frac{v_{AB}}{i_{AB}}$$

$$G_{eq} = \frac{i_{AB}}{v_{AB}}$$

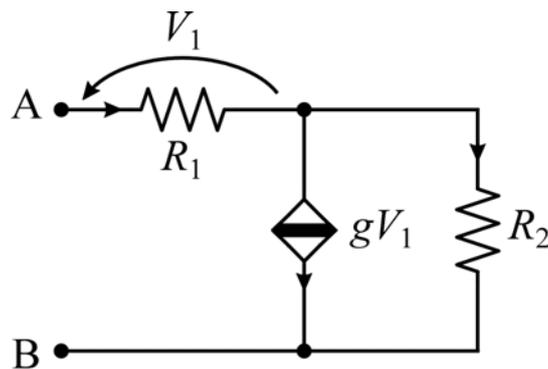
18

## Resistenza equivalente - Nota

- In casi particolari il valore della resistenza equivalente può risultare negativo
- Se  $R_{eq} < 0$ , in ogni condizione di funzionamento (tranne il che per  $v_{ab} = 0, i_{ab} = 0$ ) la potenza erogata dal bipolo è positiva, quindi il bipolo A-B è attivo
- ➔ La resistenza equivalente può essere negativa solo se il bipolo A-B contiene componenti attivi (come i generatori dipendenti)

19

## Esempio



*Determinare la resistenza equivalente del bipolo A-B.*

- Il bipolo è comandato sia in tensione che in corrente
- ➔ E' possibile valutare la resistenza equivalente
  - ◆ collegando un generatore di tensione arbitraria  $V_{AB}$  ai suoi terminali e calcolando la corrente  $I_{AB}$
  - ◆ collegando un generatore di corrente arbitraria  $I_{AB}$  ai suoi terminali e calcolando la tensione  $V_{AB}$

20

## Esempio – Metodo 1

- Si collega un generatore di tensione  $V_{AB}$  ai terminali del bipolo A-B (il valore di  $V_{AB}$  è irrilevante ai fini del calcolo di  $R_{eq}$ )
- In primo luogo si ricava l'espressione della tensione  $V_1$ , che controlla il generatore dipendente, in funzione di  $V_{AB}$

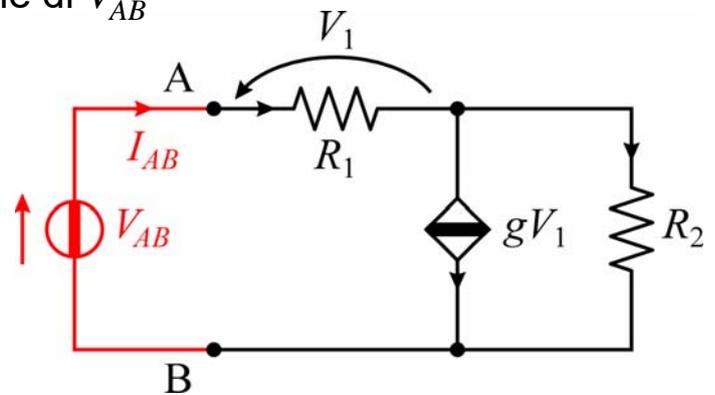
- Dalla LKV si ha

$$V_{AB} = V_1 + V_2$$

- Si esprime  $V_2$  in funzione di  $V_1$

$$V_2 = R_2 I_2 = R_2 (I_1 - gV_1) =$$

$$= R_2 \left( \frac{V_1}{R_1} - gV_1 \right)$$



- Sostituendo questa espressione nell'equazione precedente si ricava

$$V_{AB} = V_1 + \frac{R_2}{R_1} V_1 - gR_2 V_1 \quad \Rightarrow \quad V_1 = V_{AB} \frac{R_1}{R_1 + R_2 - gR_1 R_2}$$

21

## Esempio – Metodo 1

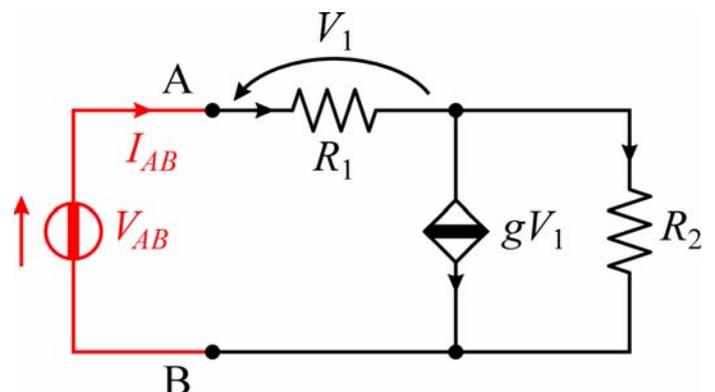
- Nota  $V_1$  si può calcolare la corrente  $I_{AB}$

$$I_{AB} = I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_{AB}}{R_1 + R_2 - gR_1 R_2}$$

- Dato che il bipolo A-B è lineare, si è ottenuta una corrente proporzionale alla tensione del generatore indipendente

- ➔ Il rapporto tra  $V_{AB}$  e  $I_{AB}$  non dipende da  $V_{AB}$  e rappresenta la resistenza equivalente del bipolo A-B

$$R_{eq} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} = R_1 + R_2 - gR_1 R_2$$



22

## Esempio – Metodo 2

- Si collega un generatore di tensione  $V_{AB}$  ai terminali del bipolo A-B (il valore di  $V_{AB}$  è irrilevante ai fini del calcolo di  $R_{eq}$ )
- Dato che  $R_1$  è in serie al generatore, si ottiene immediatamente l'espressione della variabile di controllo in funzione di  $I_{AB}$

$$V_1 = R_1 I_{AB}$$

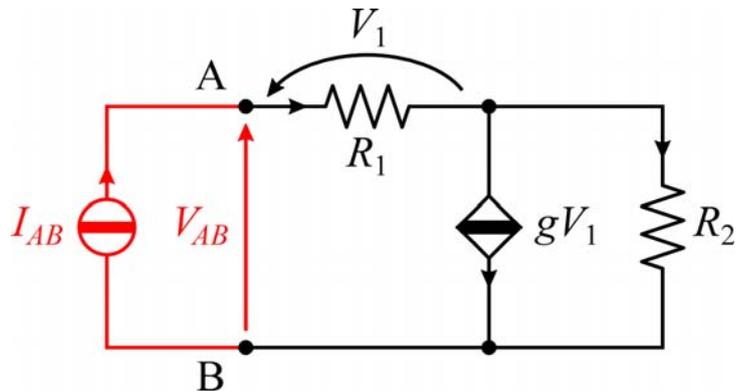
- Si calcola la tensione  $V_{AB}$

- Dalla LKV si ha

$$V_{AB} = V_1 + V_2$$

- Si ricava l'espressione di  $V_2$  in funzione di  $I_{AB}$

$$V_2 = R_2 I_2 = R_2 (I_1 - gV_1) = (R_2 - gR_1 R_2) I_{AB}$$



23

## Esempio – Metodo 2

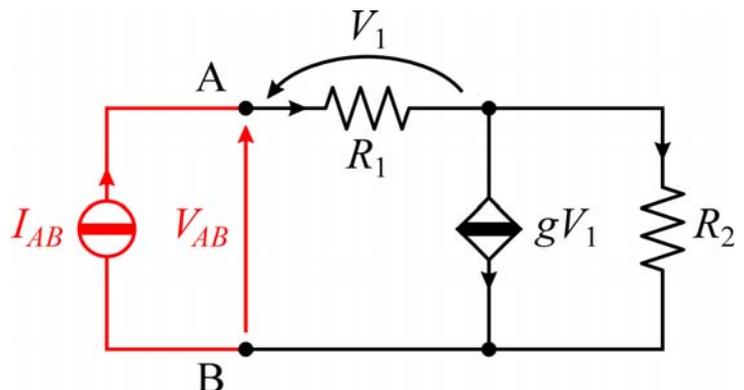
- Utilizzando le espressioni di  $V_1$  e  $V_2$  in funzione di  $I_{AB}$ , si ricava la seguente espressione di  $V_{AB}$

$$V_{AB} = (R_1 + R_2 - gR_1 R_2) I_{AB}$$

- Dato che il bipolo è A-B lineare, si è ottenuta una tensione proporzionale alla corrente del generatore indipendente

- ➔ Il rapporto tra  $V_{AB}$  e  $I_{AB}$  non dipende da  $I_{AB}$  e rappresenta la resistenza equivalente del bipolo A-B

$$R_{eq} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} = R_1 + R_2 - gR_1 R_2$$



24

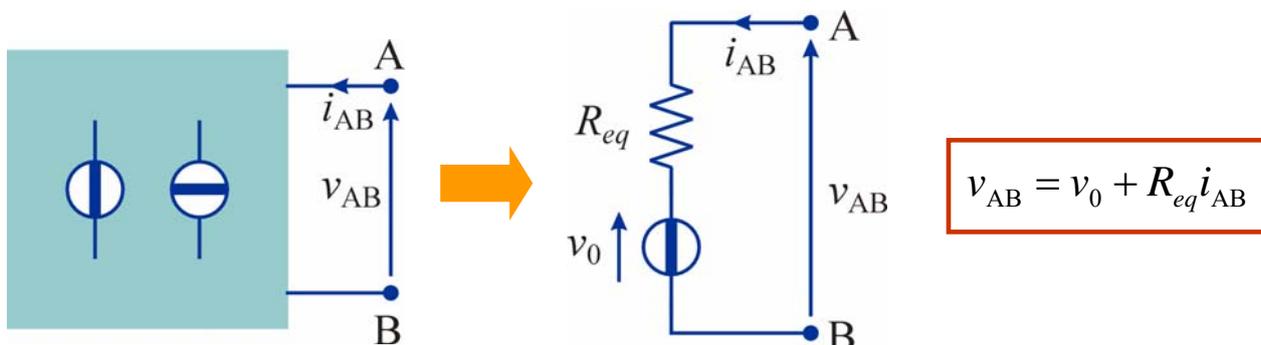
## Note

- Se il bipolo è comandato sia in tensione che in corrente i due metodi sono equivalenti
  - ➔ Si può scegliere di utilizzare il generatore con cui la soluzione del circuito risulta più semplice
- Se si deve risolvere il circuito per via numerica, si può attribuire alla tensione o alla corrente del generatore indipendente un valore scelto arbitrariamente. Ad esempio:
  - ◆ si può collegare al bipolo un generatore di tensione da 1 V, in modo che il valore numerico (in ampere) della corrente  $I_{AB}$  coincida con quello della conduttanza equivalente del bipolo (in siemens)
  - ◆ si può collegare un generatore di corrente da 1 A, in modo che il valore numerico (in volt) della tensione  $V_{AB}$  coincida con quello della resistenza equivalente (in ohm)

25

## Teorema di Thévenin

- **Ipotesi:** si considera un bipolo A-B
  - ◆ formato da componenti lineari e generatori indipendenti
  - ◆ comandato in corrente
- ➔ Il bipolo A-B equivale a un bipolo formato da un generatore indipendente di tensione  $v_0$  in serie con un resistore  $R_{eq}$ 
  - ◆  $v_0$  è la tensione a vuoto del bipolo A-B
  - ◆  $R_{eq}$  è la resistenza equivalente del bipolo A-B con i generatori indipendenti azzerati



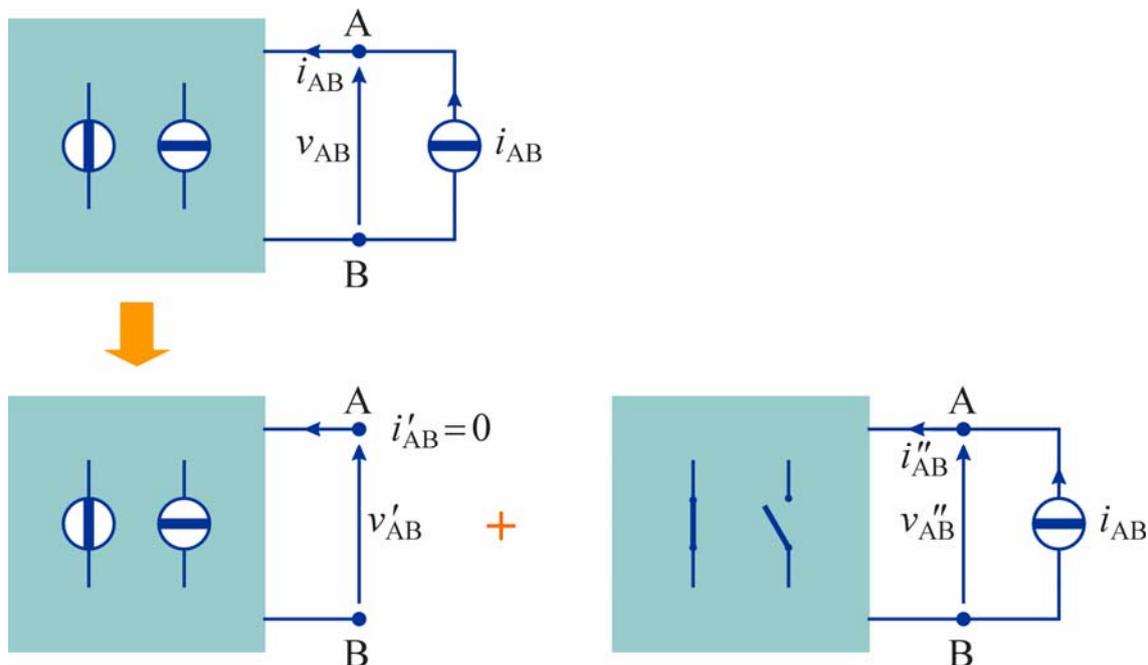
26

## Teorema di Thévenin – Dimostrazione (1)

- Per ipotesi il bipolo è comandato in corrente
  - ➔ ad ogni valore della corrente  $i_{AB}$  corrisponde uno e un solo valore della tensione  $v_{AB}$
- Per determinare la relazione tra la corrente e la tensione si può imporre il valore della corrente ai terminali mediante un generatore indipendente di corrente  $i_{AB}$  e valutare la tensione  $v_{AB}$  risolvendo il circuito così ottenuto
- Dato che il circuito è lineare, è possibile applicare il teorema di sovrapposizione e scomporre la tensione  $v_{AB}$  in due contributi
  - ◆ uno dovuto ai generatori indipendenti contenuti all'interno del bipolo, valutato con il generatore  $i_{AB}$  azzerato (➔ circuito aperto)
  - ◆ uno dovuto alla corrente  $i_{AB}$ , valutato con i generatori indipendenti interni azzerati

27

## Teorema di Thévenin – Dimostrazione (2)



$$v_{AB} = v'_{AB} + v''_{AB} = v_0 + R_{eq} i_{AB}$$

28

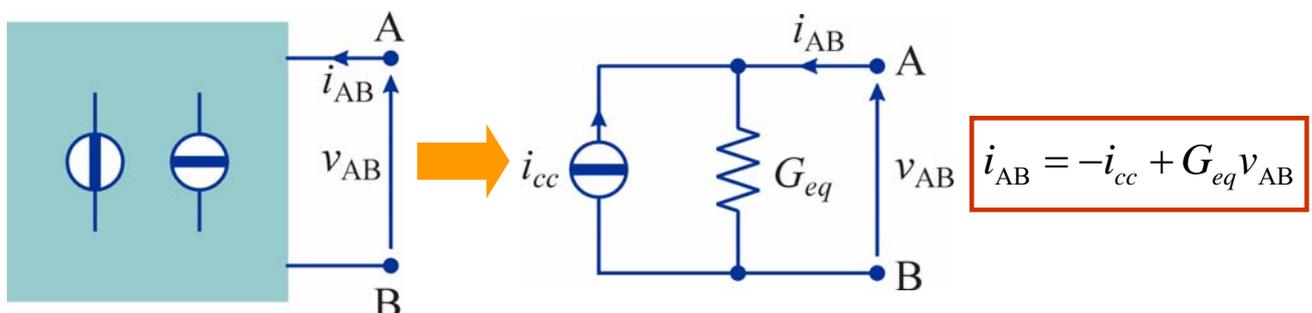
## Teorema di Thévenin – Dimostrazione (3)

- Il primo contributo,  $v'_{AB}$ , rappresenta la **tensione a vuoto** del bipolo A-B
  - ◆ è una combinazione lineare delle tensioni e delle correnti impresse dai generatori indipendenti contenuti nel bipolo A-B
  - ◆ non dipende dalla corrente  $i_{AB}$
- Il secondo contributo,  $v''_{AB}$ , è proporzionale alla corrente del generatore esterno
  - ◆ la costante di proporzionalità, cioè il rapporto tra  $v''_{AB}$  e  $i_{AB}$ , rappresenta la **resistenza equivalente** del bipolo che si ottiene azzerando i generatori indipendenti contenuti nel bipolo A-B

29

## Teorema di Norton

- **Ipotesi:** si considera un bipolo A-B
  - ◆ formato da componenti lineari e generatori indipendenti
  - ◆ comandato in tensione
- ➔ Il bipolo A-B equivale a un bipolo formato da un generatore indipendente di corrente  $i_{cc}$  in parallelo con un resistore di conduttanza  $G_{eq}$ 
  - ◆  $i_{cc}$  è la corrente di cortocircuito del bipolo A-B (con verso di riferimento, nel cortocircuito, diretto da A a B)
  - ◆  $G_{eq}$  ( $=1/R_{eq}$ ) è la conduttanza equivalente del bipolo A-B con i generatori indipendenti azzerati



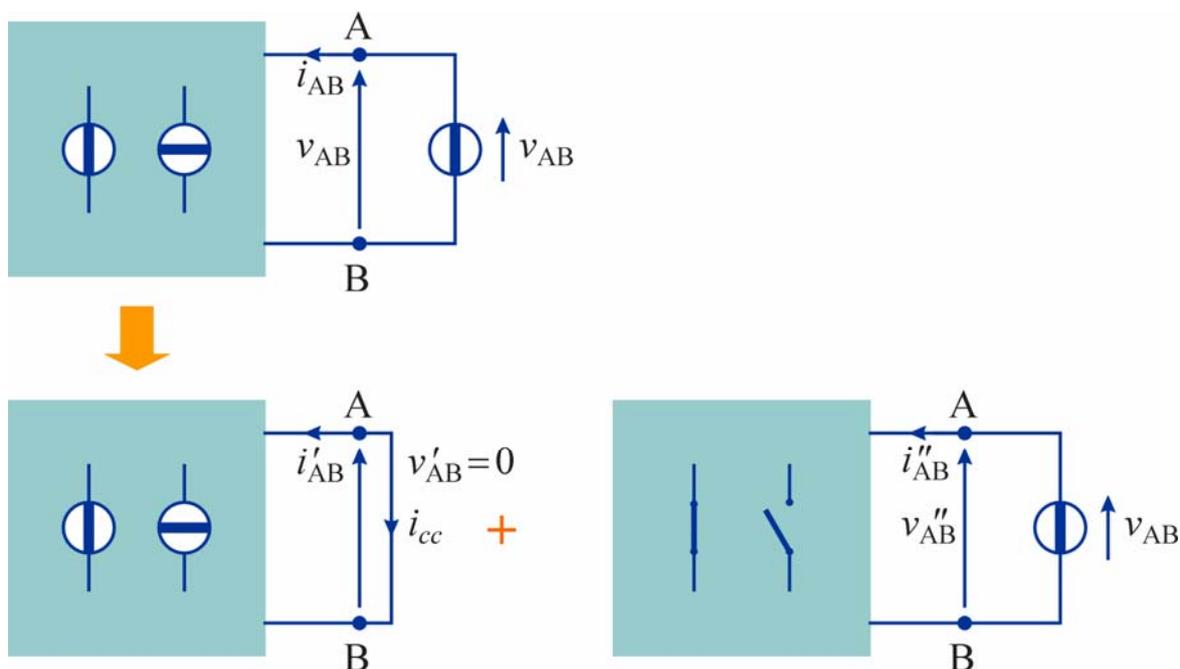
30

## Teorema di Norton – Dimostrazione (1)

- Per ipotesi il bipolo è comandato in tensione
  - ➔ ad ogni valore della tensione  $v_{AB}$  corrisponde uno e un solo valore della corrente  $i_{AB}$
- Per determinare la relazione tra la tensione e la corrente si può imporre il valore della tensione ai terminali mediante un generatore indipendente di tensione  $v_{AB}$  e valutare la corrente  $i_{AB}$  risolvendo il circuito così ottenuto
- Dato che il circuito è lineare, è possibile applicare il teorema di sovrapposizione e scomporre la corrente  $i_{AB}$  in due contributi
  - ◆ uno dovuto ai generatori indipendenti contenuti all'interno del bipolo, valutato con il generatore  $v_{AB}$  azzerato (➔ cortocircuito)
  - ◆ uno dovuto alla tensione  $v_{AB}$ , valutato con i generatori indipendenti interni azzerati

31

## Teorema di Norton – Dimostrazione (2)



$$i_{AB} = i'_{AB} + i''_{AB} = -i_{cc} + G_{eq} v_{AB}$$

32

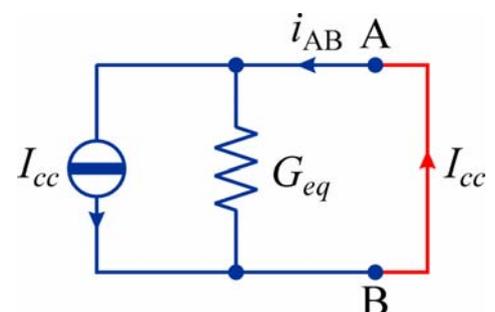
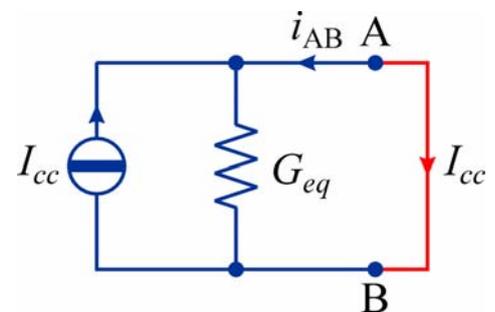
## Teorema di Norton – Dimostrazione (3)

- Il primo contributo,  $i'_{AB}$ , rappresenta l'opposto della **corrente di cortocircuito** del bipolo A-B ( $i'_{AB} = -i_{cc}$ )
  - ◆ è una combinazione lineare delle tensioni e delle correnti impresse dai generatori indipendenti contenuti nel bipolo A-B
  - ◆ non dipende dalla tensione  $v_{AB}$
- Il secondo contributo,  $i''_{AB}$ , è proporzionale alla tensione del generatore esterno
  - ◆ la costante di proporzionalità, cioè il rapporto tra  $i''_{AB}$  e  $v_{AB}$ , rappresenta la **conduttanza equivalente** del bipolo che si ottiene azzerando i generatori indipendenti contenuti nel bipolo A-B

33

## Teorema di Norton – Nota

- Il verso di riferimento attribuito alla corrente nel cortocircuito è correlato al verso del generatore presente nel circuito equivalente
  - ◆ una corrente diretta (nel cortocircuito) da A verso B corrisponde alla corrente di un generatore con il verso di riferimento entrante nel nodo A
  - ◆ se il verso di fosse scelto da B ad A, la corrente corrisponderebbe a quella di un generatore con verso entrante nel nodo B, quindi il circuito equivalente dovrebbe essere modificato come indicato nella figura

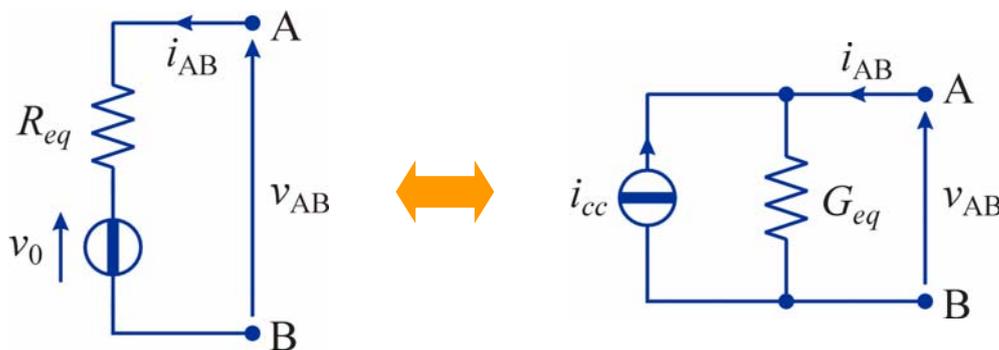


34

## Bipoli equivalenti di Thévenin e Norton

- Se il bipolo A-B ammette sia il circuito equivalente di Thévenin sia il circuito equivalente di Norton, questi sono anche equivalenti tra loro, quindi (con i versi di riferimento indicati nella figura) valgono le relazioni

$$R_{eq} = \frac{1}{G_{eq}} \quad v_0 = R_{eq} i_{cc}$$



35

## Calcolo dei parametri dei bipoli equivalenti di Thévenin e Norton

- E' possibile ricavare simultaneamente i parametri del bipolo equivalente di Thévenin (o di Norton) risolvendo il circuito ottenuto collegando al bipolo dato un generatore indipendente di corrente (o di tensione) come è stato fatto per dimostrare i teoremi
- Spesso risulta più conveniente calcolare separatamente i tre parametri
- Per ciascun parametro si deve studiare un circuito diverso:
  - analisi del bipolo a vuoto, per il calcolo di  $V_0$
  - analisi del bipolo con i terminali in cortocircuito per il calcolo di  $I_{cc}$
  - analisi del bipolo con i generatori indipendenti azzerati per il calcolo di  $R_{eq}$
- E' opportuno sottolineare che
  - le tre analisi sono indipendenti tra loro: nello studio di ciascuno di questi circuiti non si possono utilizzare valori di tensioni o correnti determinati risolvendo uno degli altri due circuiti
  - per il calcolo di  $R_{eq}$  **non si devono azzerare i generatori dipendenti**

36