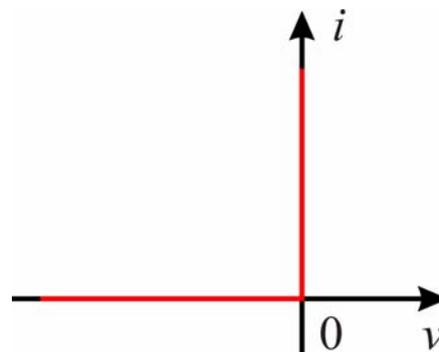
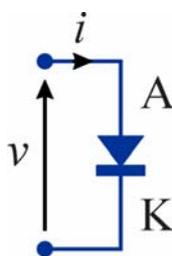


Diodi

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 6-3-2016)

Diodo ideale

- Il **diodo ideale** è un componente la cui caratteristica è definita a tratti nel modo seguente
 - $i = 0$ per $v < 0$ (**polarizzazione inversa**)
 - $v = 0$ per $i > 0$ (**polarizzazione diretta**)
- ➔ Il diodo ideale si comporta
 - ◆ come un circuito aperto nella regione inversa (o di **interdizione**)
 - ◆ come un cortocircuito nella regione diretta (o di **conduzione**)
- Il terminale positivo è detto **anodo**, il terminale negativo è detto **catodo**



Diodo ideale

- In ciascuna regione il comportamento è lineare, ma la caratteristica complessiva è non lineare
 - ◆ Se il segnale applicato al diodo è tale da mantenere il punto di funzionamento sempre all'interno di una sola regione il comportamento è lineare
 - ◆ Se il punto di funzionamento si sposta da una regione all'altra il comportamento è non lineare

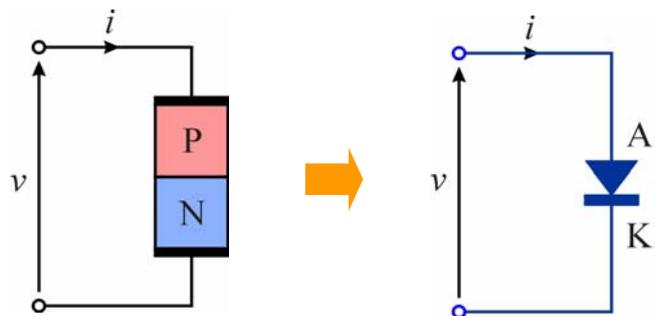
3

Diodo a giunzione

- I dispositivi reali aventi un comportamento che approssima quello del diodo ideale sono chiamati genericamente **diodi**
- Attualmente il modo più comune per realizzare un diodo consiste nell'impiego di una giunzione pn
- Per un diodo a giunzione le relazioni che legano la tensione e le correnti ai terminali sono

$$i = I_S \left(e^{v/V_T} - 1 \right)$$

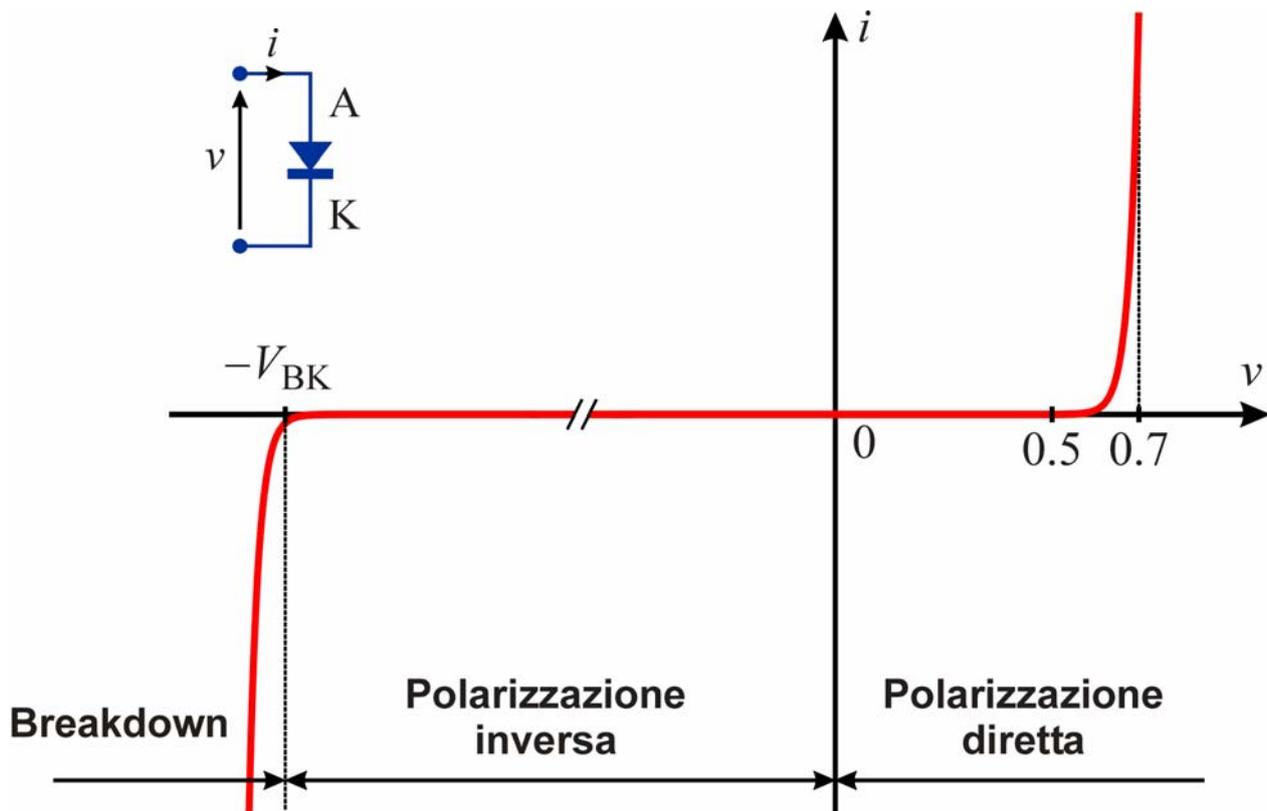
$$v = V_T \ln \left(1 + \frac{i}{I_S} \right)$$



(Queste equazioni valgono al di fuori della regione di breakdown)

4

Curva caratteristica del diodo a giunzione



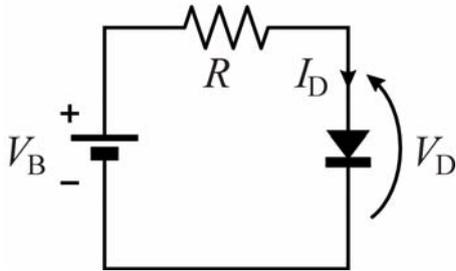
5

Analisi di circuiti con diodi a giunzione

- L'analisi di circuiti con diodi a giunzione richiede la risoluzione di equazioni non lineari
 - ◆ Normalmente non è possibile risolvere le equazioni in forma chiusa
 - ◆ La soluzione può essere determinata per via numerica o, nei casi più semplici, per via grafica
- Nel caso di circuiti complessi, è possibile ottenere soluzioni accurate solo impiegando programmi di simulazione circuitale
- Spesso è sufficiente una valutazione approssimata della soluzione
 - ◆ In questo caso si può ricorrere a modelli semplificati del diodo (per esempio lineari a tratti)

6

Esempio



$$\begin{aligned}V_B &= 10 \text{ V} \\ R &= 1 \text{ k}\Omega \\ I_S &= 10 \text{ fA} \\ V_T &= 26 \text{ mV}\end{aligned}$$

- Determinare la tensione e la corrente del diodo

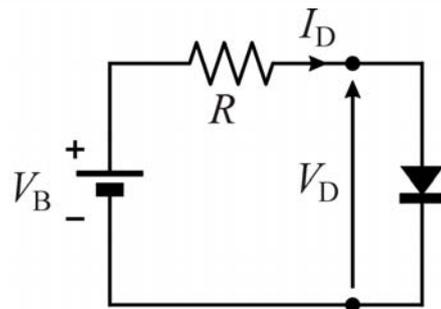
7

Risoluzione per via grafica

- Devono essere soddisfatte le equazioni

$$I_D = I_S (e^{V_D/V_T} - 1)$$

$$I_D = \frac{V_B - V_D}{R}$$



- ➔ Il punto (V_D, I_D) , cioè il **punto di lavoro del diodo**, deve appartenere sia alla curva caratteristica del diodo, sia alla caratteristica del bipolo formato dal generatore e dal resistore
- Quest'ultima è rappresentata dalla retta di equazione

$$i = \frac{V_B - v}{R}$$

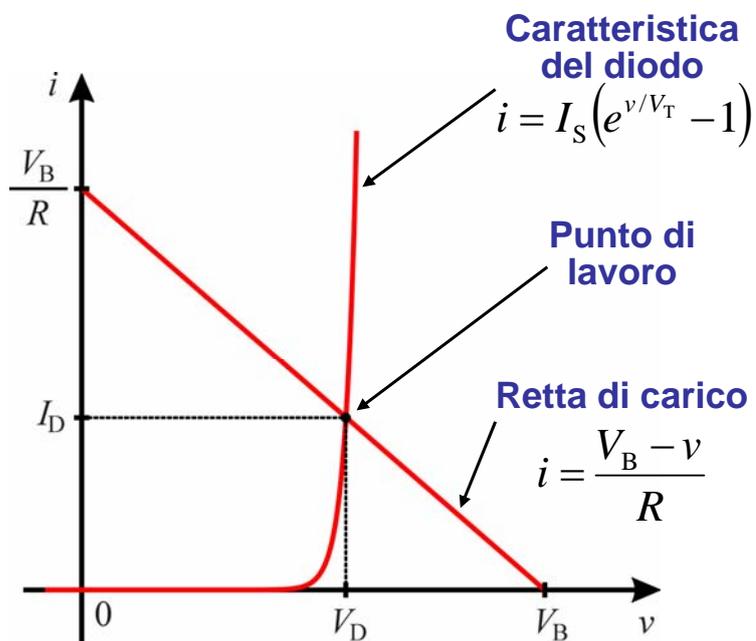
che è chiamata **retta di carico**

- ◆ La retta di carico interseca gli assi nei punti $(0, V_B/R)$ e $(V_B, 0)$

8

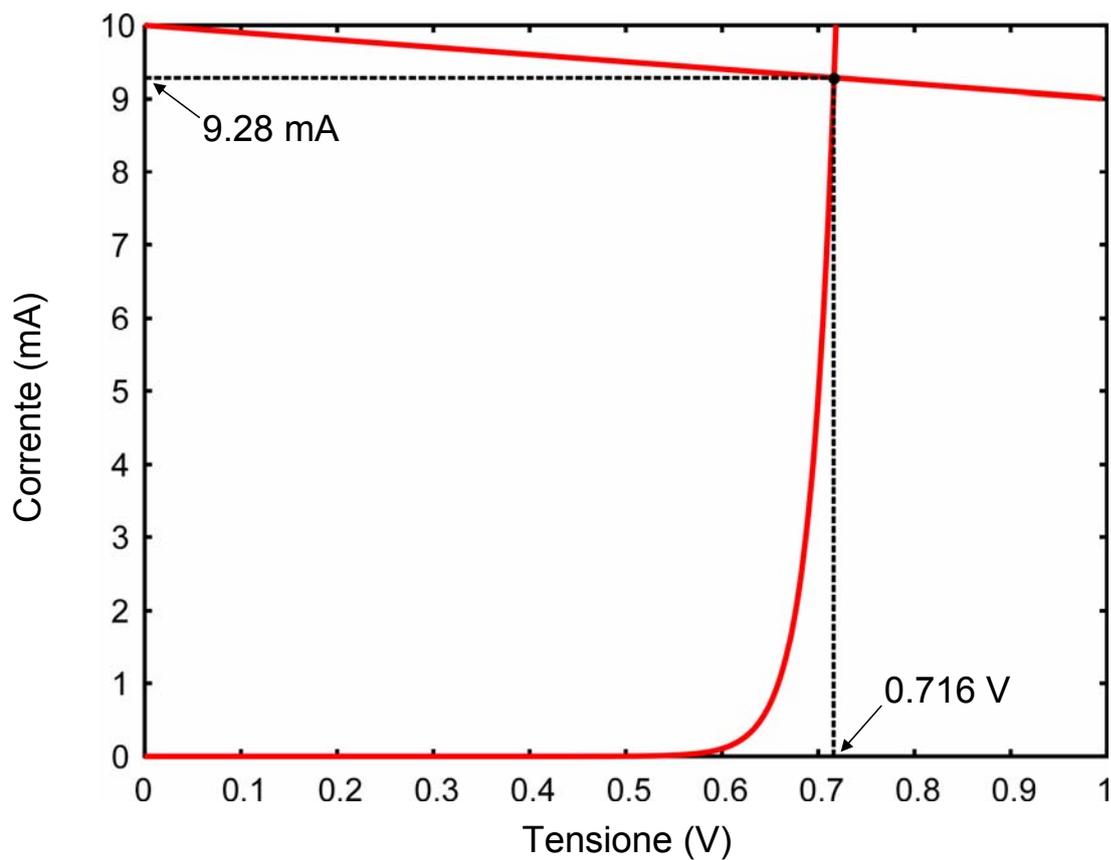
Risoluzione per via grafica

- E' possibile determinare per via grafica il punto di lavoro cercando l'intersezione della curva caratteristica del diodo con la retta di carico



9

Risoluzione per via grafica



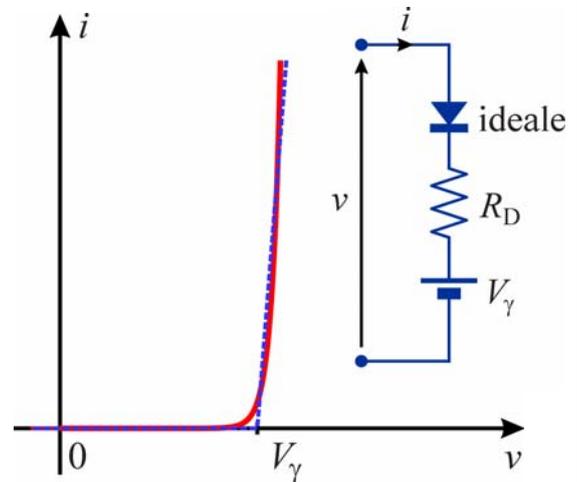
10

Modello a soglia con resistenza serie

- L'analisi di circuiti a diodi può essere notevolmente semplificata utilizzando modelli lineari a tratti
- Per esempio si può approssimare la caratteristica del diodo con due semirette (una delle quali è orizzontale) nel modo seguente

$$i = \begin{cases} 0 & \text{per } v \leq V_\gamma \\ \frac{v - V_\gamma}{R_D} & \text{per } v > V_\gamma \end{cases}$$

- Queste equazioni possono essere interpretate mediante un circuito equivalente formato da un diodo ideale, un resistore R_D e un generatore V_γ collegati in serie



- I valori di V_γ e R_D dipendono dall'intervallo di valori della corrente i che interessa considerare (valori tipici: $V_\gamma = 0.6-0.7$ V, $R_D = 1-100$ Ω)

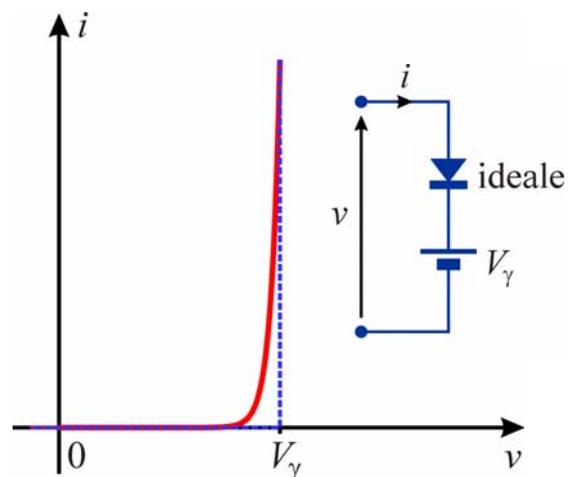
11

Modello a soglia e modello a diodo ideale

- Se si può ritenere che, quando il diodo è in conduzione, la sua tensione sia praticamente costante è possibile omettere la resistenza R_D
- In queste condizioni le equazioni si riducono a

$$\begin{aligned} i &= 0 & \text{per } v \leq V_\gamma \\ v &= V_\gamma & \text{per } i > 0 \end{aligned}$$

- Il modello così ottenuto è detto **a soglia**
- Anche in questo caso i valori tipici di V_γ sono di 0.6-0.7 V



- In alcune applicazioni i valori delle tensioni in gioco possono essere tali per cui V_γ è trascurabile
- In questo caso è possibile eliminare il generatore e rappresentare il diodo come ideale

12

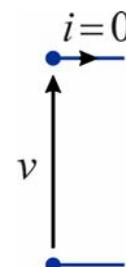
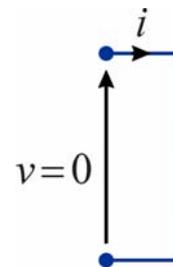
Caratteristiche definite a tratti

- I modelli semplificati del diodo illustrati nelle diapositive precedenti hanno caratteristiche definite *a tratti*
- In generale in un modello definito a tratti
 - ◆ si hanno più **regioni di funzionamento** in ciascuna delle quali il dispositivo è descritto da equazioni diverse
 - ◆ a ciascuna delle regioni di funzionamento sono associate delle **condizioni di validità** che le tensioni e le correnti devono soddisfare affinché il dispositivo possa funzionare in quella regione
- In ciascuna delle regioni di funzionamenti il dispositivo può essere rappresentato mediante un circuito equivalente diverso

13

Diodo ideale

- **Regione di conduzione**
 - ◆ Equazione caratteristica: $v = 0$
 - ◆ Condizione di validità: $i > 0$
- **Regione di interdizione**
 - ◆ Equazione caratteristica: $i = 0$
 - ◆ Condizione di validità: $v < 0$

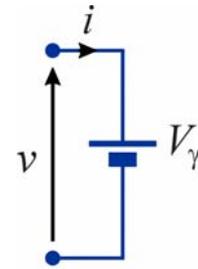


14

Modello a soglia

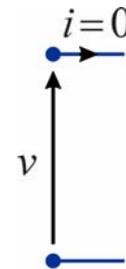
- **Regione di conduzione**

- ◆ Equazione caratteristica: $v = V_\gamma$
- ◆ Condizione di validità: $i > 0$



- **Regione di interdizione**

- ◆ Equazione caratteristica: $i = 0$
- ◆ Condizione di validità: $v < V_\gamma$

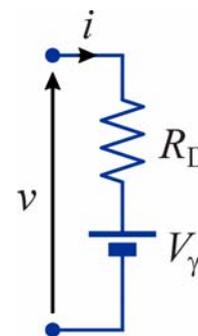


15

Modello a soglia con resistenza serie

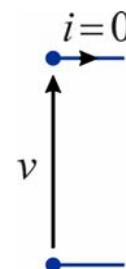
- **Regione di conduzione**

- ◆ Equazione caratteristica: $v = V_\gamma + R_D i$
- ◆ Condizione di validità: $i > 0$



- **Regione di interdizione**

- ◆ Equazione caratteristica: $i = 0$
- ◆ Condizione di validità: $v < V_\gamma$



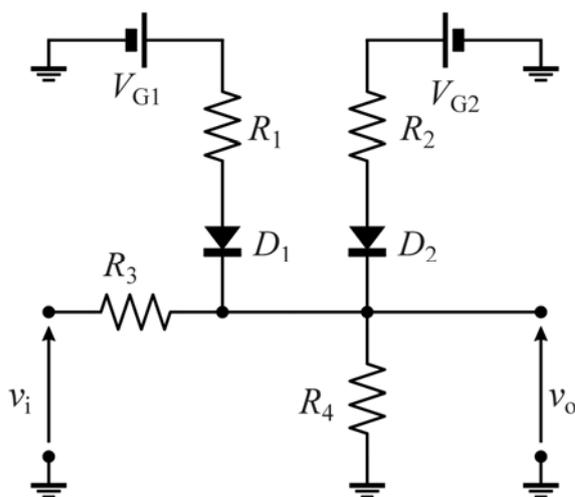
16

Analisi di circuiti a diodi con i modelli semplificati

- In generale, per analizzare un circuito con dispositivi aventi caratteristiche definite a tratti occorre
 - ◆ studiare i circuiti equivalenti relativi alle varie regioni di funzionamento
 - ◆ verificare se le condizioni di validità sono soddisfatte, cioè se le soluzioni sono accettabili
- Se il circuito contiene più diodi si dovrebbero considerare tutte le possibili combinazioni di circuiti equivalenti
 - ◆ In pratica, spesso è possibile riconoscere a priori che alcune combinazioni non sono accettabili e quindi devono essere escluse
 - ◆ Di solito è possibile formulare un'ipotesi iniziale sullo stato dei diodi e procedere per correzioni successive finché tutte le condizioni di validità sono soddisfatte

17

Esempio



$$\begin{aligned}R_1 &= 1\text{ k}\Omega \\R_2 &= 3\text{ k}\Omega \\R_3 &= 2\text{ k}\Omega \\R_4 &= 6\text{ k}\Omega \\V_{G1} &= 6\text{ V} \\V_{G2} &= 12\text{ V}\end{aligned}$$

- Utilizzando il modello a soglia con $V_\gamma = 0.7\text{ V}$, determinare la tensione di uscita v_o per $v_i = 9\text{ V}$

18

Esempio

- **Ipotesi 1:** D_1 e D_2 in conduzione (➔ $i_{D1} > 0, i_{D2} > 0$)

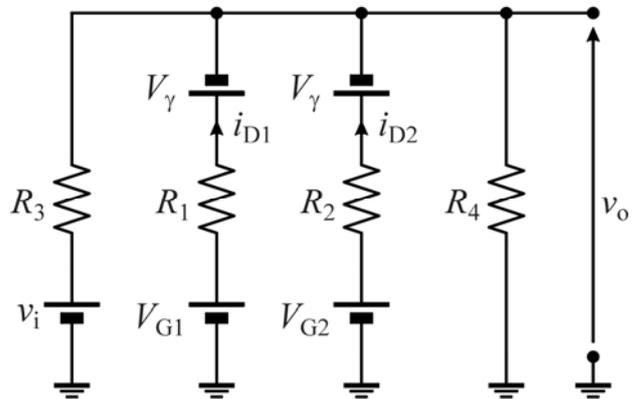
$$v_o = \frac{\frac{V_{G1} - V_\gamma}{R_1} + \frac{V_{G2} - V_\gamma}{R_2} + \frac{v_i}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = 6.78 \text{ V}$$



$$i_{D1} = \frac{V_{G1} - V_\gamma - v_o}{R_1} = -1.48 \text{ mA}$$

- ➔ Non compatibile con le ipotesi
- ➔ La soluzione non è accettabile

$$i_{D2} = \frac{V_{G2} - V_\gamma - v_o}{R_2} = 1.51 \text{ mA}$$



19

Esempio

- **Ipotesi 2:** D_1 interdetto, D_2 in conduzione (➔ $v_{D1} < V_\gamma, i_{D2} > 0$)

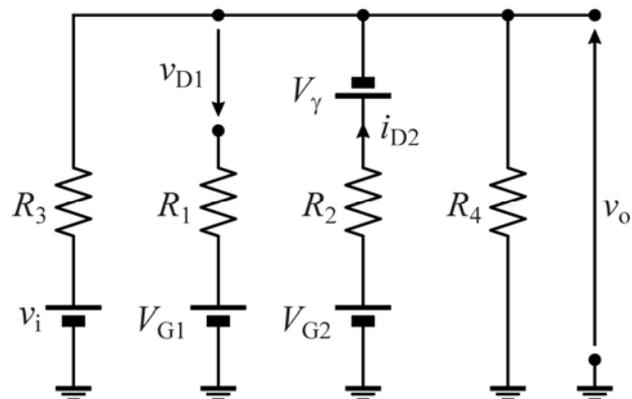
$$v_o = \frac{\frac{V_{G2} - V_\gamma}{R_2} + \frac{v_i}{R_3}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = 8.27 \text{ V}$$



$$v_{D1} = V_{G1} - v_o = -0.78 \text{ V}$$

- ➔ Soluzione accettabile

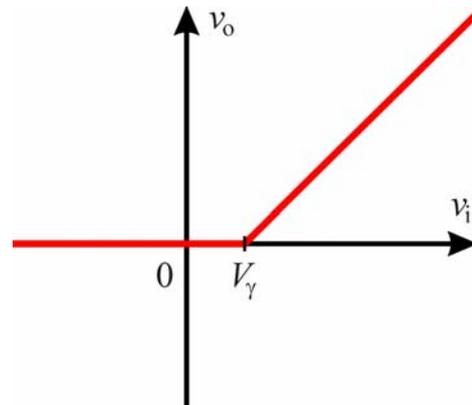
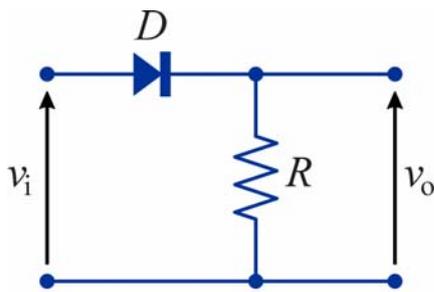
$$i_{D2} = \frac{V_{G2} - V_\gamma - v_o}{R_2} = 1.01 \text{ mA}$$



20

Raddrizzatore a singola semionda

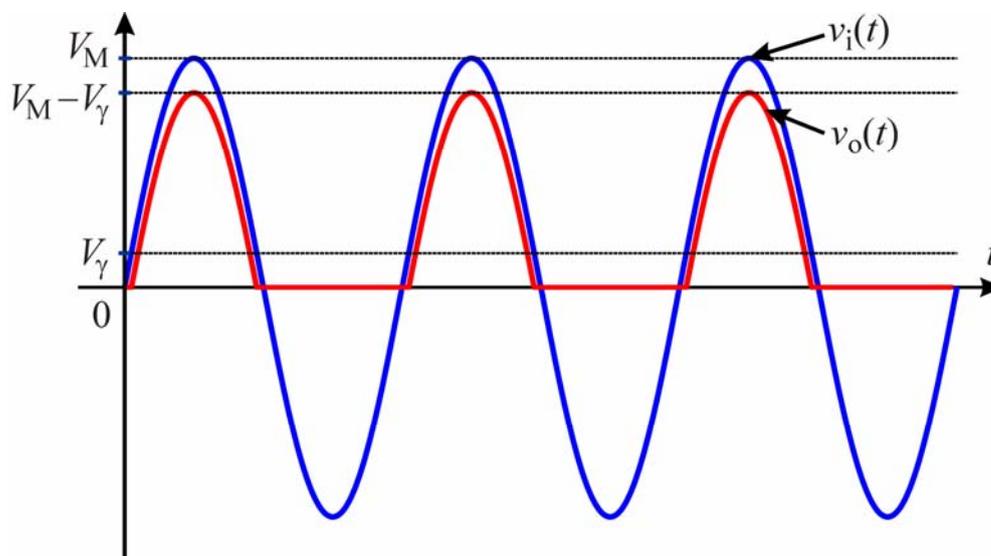
- Una delle applicazioni fondamentali del diodo è il circuito **raddrizzatore**, che permette di ottenere una tensione unidirezionale a partire da una tensione alternata
- Utilizzando il modello a soglia si ottiene che
 - ♦ per $v_i \leq V_\gamma$ il diodo è interdetto, quindi $v_o = 0$
 - ♦ per $v_i > V_\gamma$ il diodo è in conduzione, quindi $v_o = v_i - V_\gamma$



21

Raddrizzatore a singola semionda

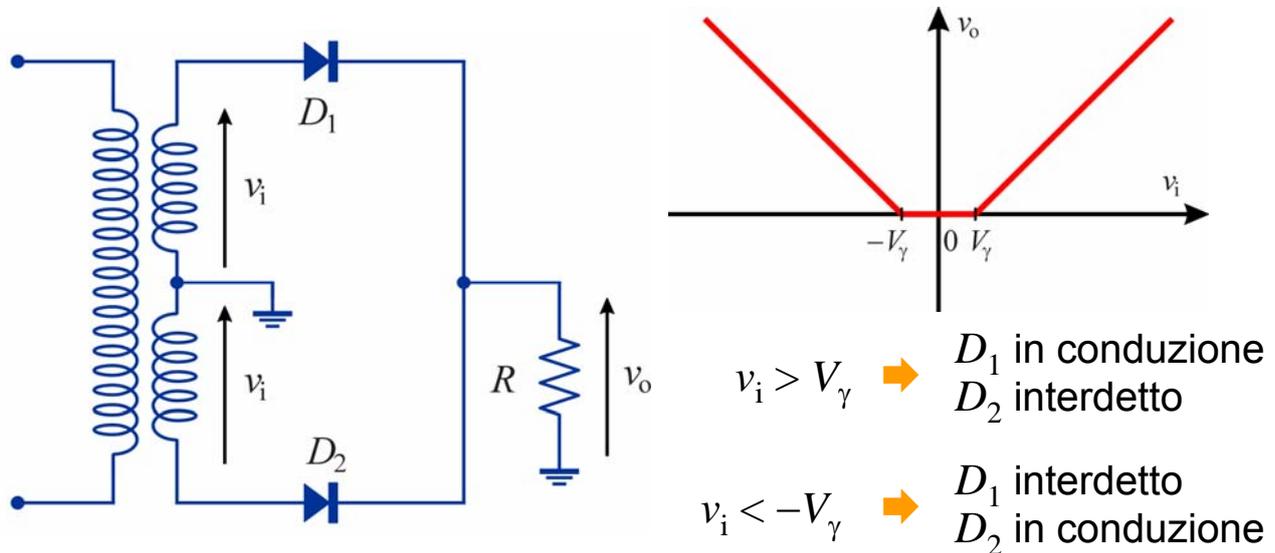
- Se l'ingresso è sinusoidale il diodo conduce durante le semionde positive e rimane interdetto durante le semionde negative



22

Raddrizzatore a doppia semionda

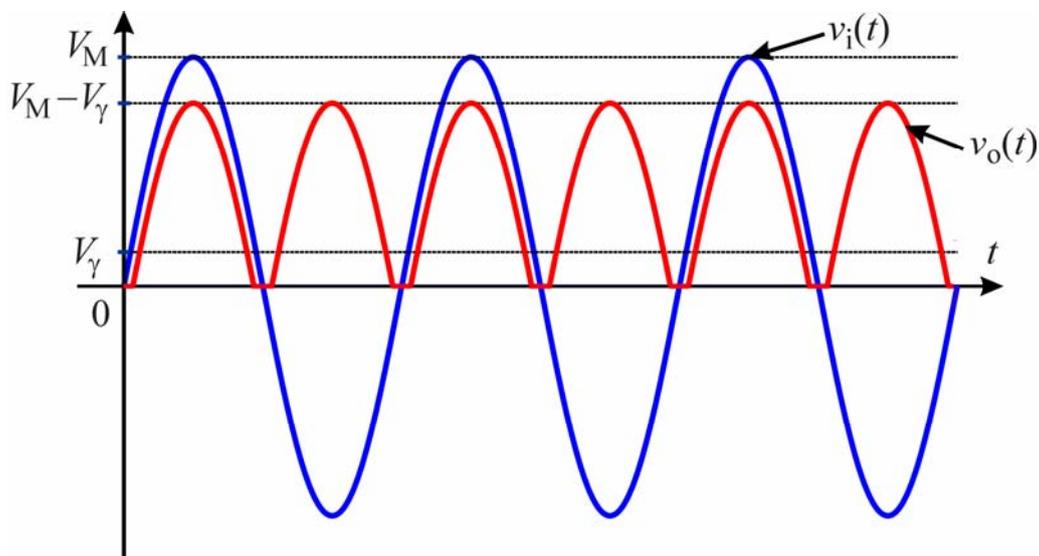
- I **raddrizzatori a doppia semionda** (o ad onda intera) consentono di utilizzare entrambe le semionde della tensione alterata in ingresso
- Utilizzando un trasformatore con presa centrale, che fornisce due tensioni uguali e con polarità opposte, si può realizzare un raddrizzatore a doppia semionda abbinando due raddrizzatori a singola semionda



23

Raddrizzatore a doppia semionda

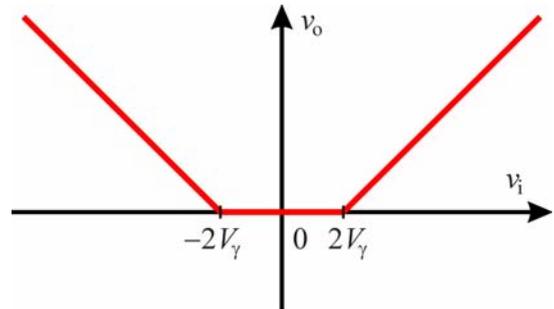
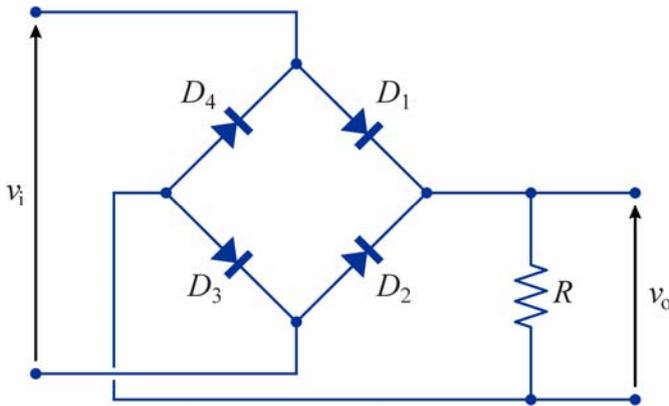
- Se la tensione in ingresso è sinusoidale, D_1 conduce durante le semionde positive, D_2 durante le semionde negative (per $|v_i| < V_\gamma$ entrambi i diodi sono interdetti)



24

Raddrizzatore a ponte

- Un altro circuito utilizzato comunemente per realizzare un raddrizzatore a doppia semionda è il seguente (detto anche **ponte di Graetz**)



- Durante ciascuna semionda, per $|v_i| > 2V_\gamma$, una delle coppie di diodi D_1 - D_3 o D_2 - D_4 è in conduzione mentre l'altra è interdetta

25

Raddrizzatore a ponte

- Per $v_i > 2V_\gamma$ i diodi D_1 e D_3 sono in conduzione mentre D_2 e D_4 sono interdetti

- Infatti si ha:

$$i_{D1} = i_{D3} = i_R = \frac{v_i - 2V_\gamma}{R}$$

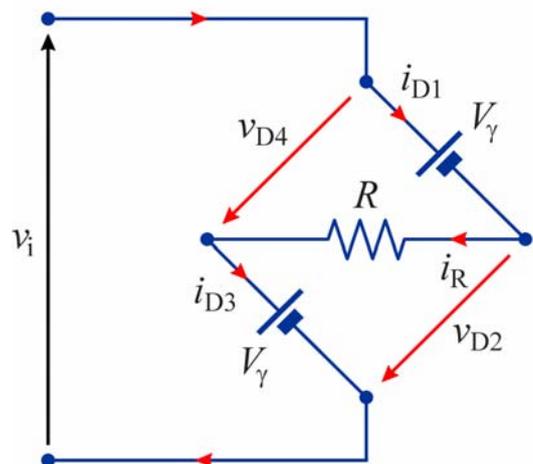
$$i_{D1} = i_{D3} > 0 \Rightarrow v_i > 2V_\gamma$$

- Inoltre in queste condizioni risulta

$$v_{D2} = v_{D4} = v_\gamma - v_i < 0$$

- Quindi la tensione di uscita è

$$v_o = v_i - 2V_\gamma$$



26

Raddrizzatore a ponte

- In modo analogo si può verificare che $v_i < 2V_\gamma$ i diodi D_2 e D_4 sono in conduzione mentre D_1 e D_3 sono interdetti

- Infatti in queste condizioni si ha:

$$i_{D2} = i_{D4} = i_R = \frac{-v_i - 2V_\gamma}{R}$$

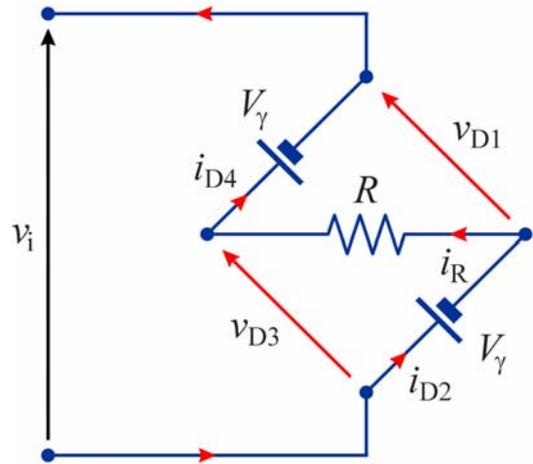
$$i_{D2} = i_{D4} > 0 \Rightarrow v_i < -2V_\gamma$$

$$v_{D1} = v_{D3} = v_\gamma + v_i < 0$$

- Quindi la tensione di uscita è

$$v_o = -v_i - 2V_\gamma$$

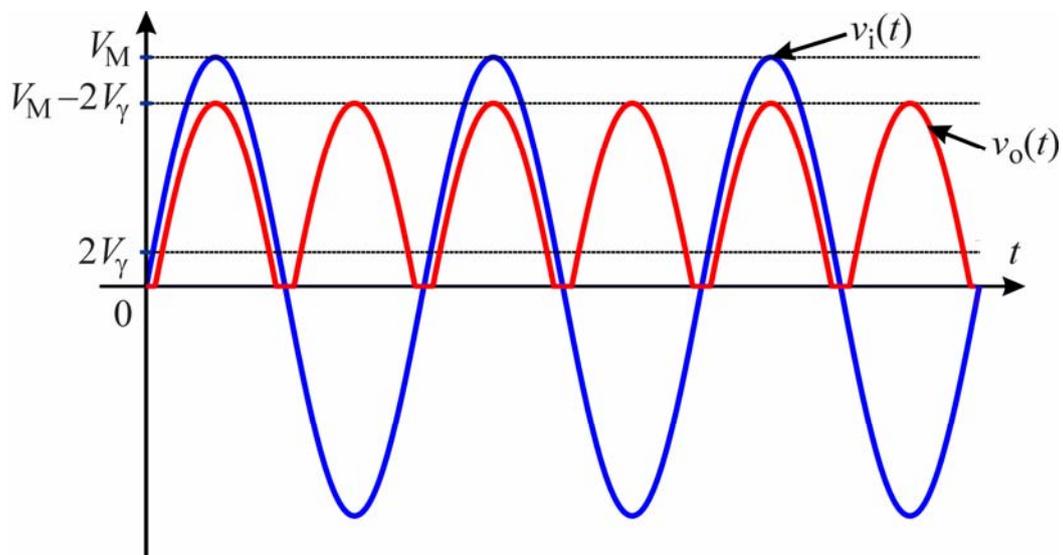
- Per $|v_i| < 2V_\gamma$ i diodi sono tutti interdetti e quindi la tensione v_o è nulla



27

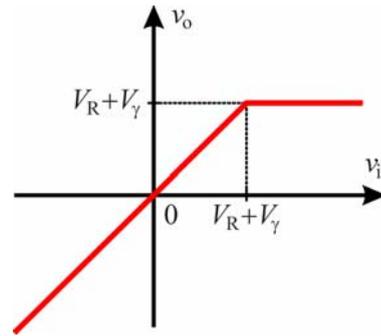
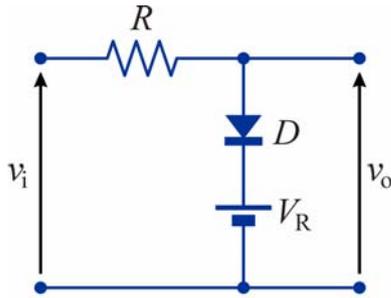
Raddrizzatore a ponte

- Se la tensione in ingresso è sinusoidale, l'andamento della tensione di uscita è il seguente



28

Limitatori

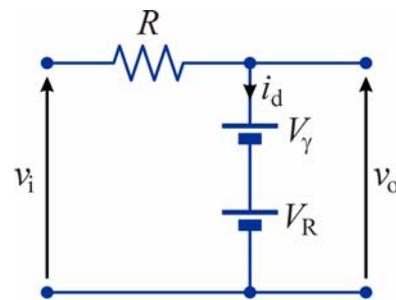


- Se v_i supera il valore $V_R + V_\gamma$ il diodo entra in conduzione, impedendo a v_o di superare il valore $V_R + V_\gamma$

$$i_d = \frac{v_i - V_\gamma - V_R}{R}$$

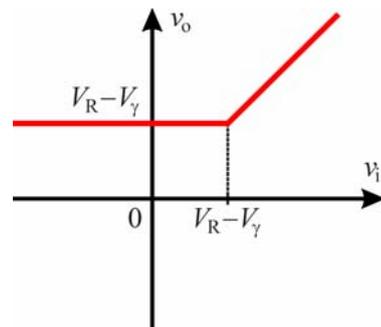
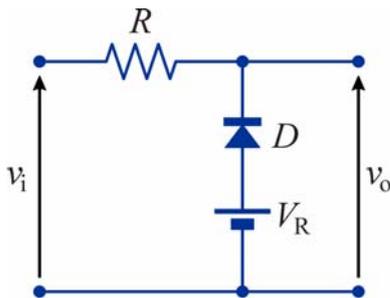
$$i_d > 0 \Rightarrow v_i > V_R + V_\gamma$$

$$v_o = \begin{cases} v_i & \text{per } v_i < V_R + V_\gamma \\ V_R + V & \text{per } v_i \geq V_R + V_\gamma \end{cases}$$



29

Limitatori

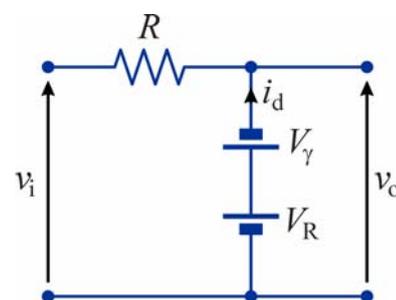


- Se si invertono i terminali del diodo, questo entra in conduzione quando la tensione di ingresso scende al di sotto di $V_R - V_\gamma$, quindi la tensione di uscita viene limitata inferiormente

$$i_d = \frac{V_R - V_\gamma - v_i}{R}$$

$$i_d > 0 \Rightarrow v_i < V_R - V_\gamma$$

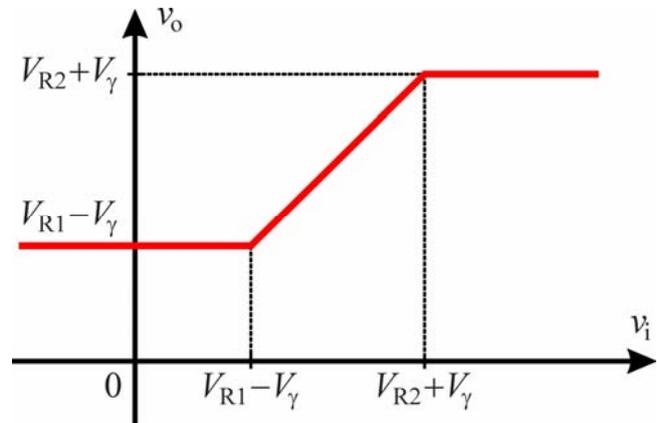
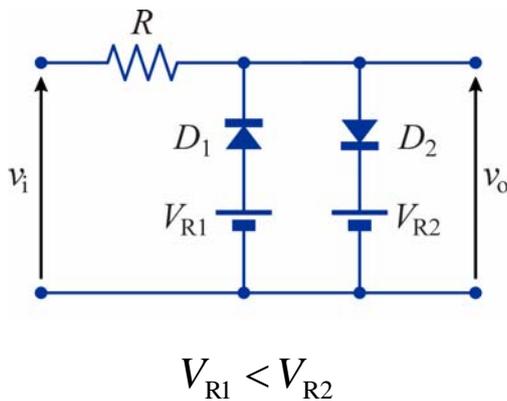
$$v_o = \begin{cases} V_R - V & \text{per } v_i \leq V_R - V_\gamma \\ v_i & \text{per } v_i > V_R - V_\gamma \end{cases}$$



30

Limitatori

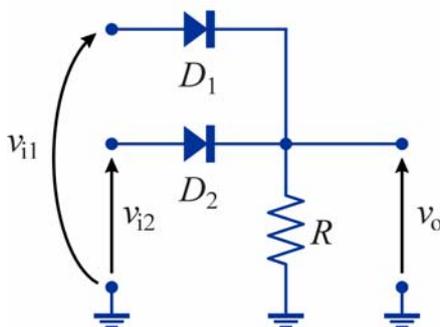
- Combinando i circuiti precedenti è possibile limitare l'escursione della tensione in uscita sia inferiormente sia superiormente



31

Porta OR

- Si rappresenta il livello logico 0 con una tensione di 0 V e il livello 1 con una tensione positiva V_R
- Se entrambi gli ingressi sono a livello 0 i diodi sono interdetti e quindi l'uscita è a 0
- Se uno degli ingressi è a livello 1, il diodo corrispondente va in conduzione portando l'uscita a 1
- ➔ Il circuito realizza la funzione OR

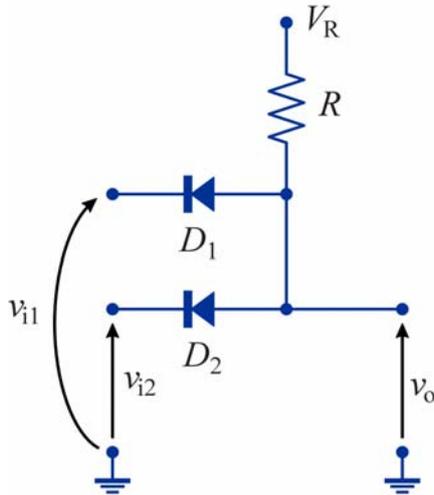


v_{i1}	v_{i2}	v_o
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

32

Porta AND

- Se entrambi gli ingressi sono a livello 1 i diodi sono interdetti, quindi l'uscita è a livello 1
- Se uno degli ingressi è a livello 0, il diodo corrispondente va in conduzione portando l'uscita a livello 0
- ➔ Il circuito realizza la funzione AND

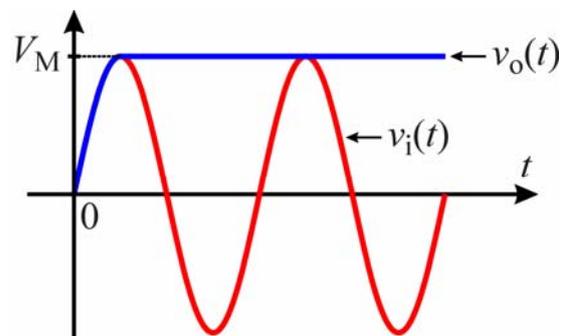
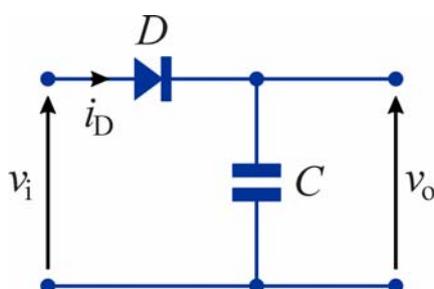


v_{i1}	v_{i1}	v_o
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

33

Rivelatore di picco

- Si applica all'ingresso del circuito una tensione sinusoidale
- Si assume che il condensatore inizialmente sia scarico
- Inoltre, per semplicità, si assume che il diodo sia ideale
- Inizialmente il diodo è in conduzione e $v_o = v_i$, quindi il condensatore si carica fino a quando v_i raggiunge il valore di picco V_M
- Successivamente il condensatore non può scaricarsi, perché questo richiederebbe che la corrente i_D divenisse negativa
- Negli istanti successivi la tensione di uscita rimane costante al valore V_M e quindi il diodo rimane interdetto



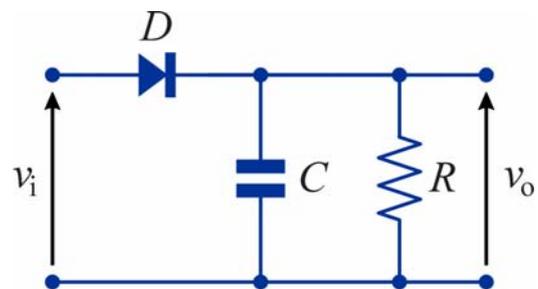
34

Raddrizzatore con capacità di filtro

- In presenza di una resistenza di carico R , quando il diodo va in interdizione il condensatore si scarica attraverso R
- Il diodo può entrare in conduzione quando la tensione di ingresso supera la tensione di uscita
- Quando il diodo è in conduzione $v_o = v_i$ e il condensatore si carica
- Quando v_o raggiunge il valore V_M il diodo passa in interdizione e il condensatore si scarica
- Quindi l'andamento di v_o a partire dal valore massimo è dato da

$$v_o(t) = V_M e^{-t/RC}$$

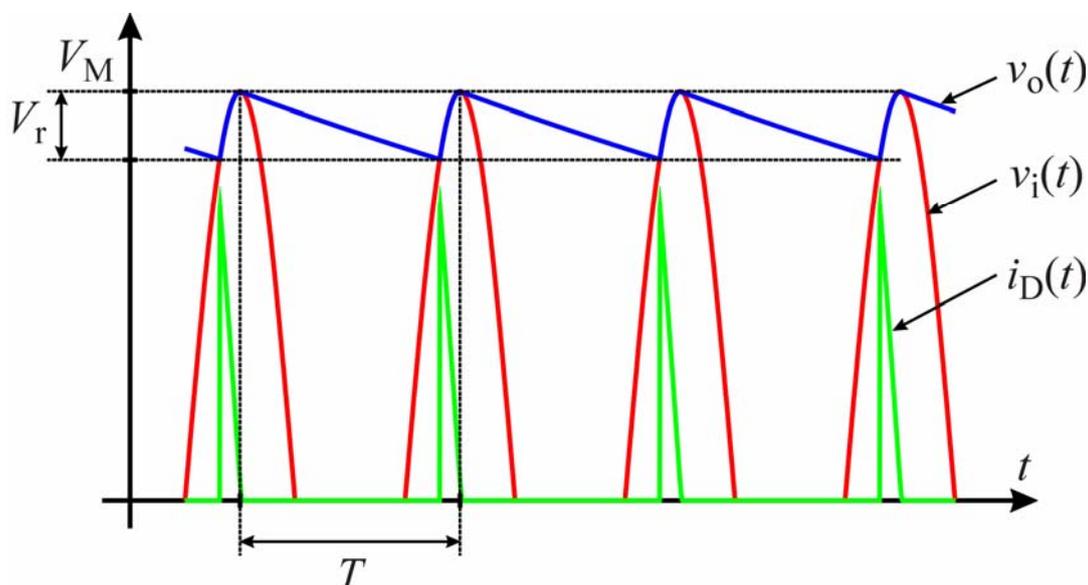
- Si assume che i valori di R e C siano dimensionati in modo che la costante di tempo sia molto grande rispetto al periodo T della tensione di ingresso



35

Raddrizzatore con capacità di filtro

- Quindi si può assumere che
 - ◆ La variazione della tensione di uscita sia molto piccola nell'intervallo in cui il diodo è interdetto
 - ◆ Il diodo conduca per intervalli di tempo molto brevi rispetto a T



36

Raddrizzatore con capacità di filtro

- In queste condizioni
 - ◆ La durata dell'intervallo in cui il condensatore si scarica si può considerare circa uguale a T
 - ◆ L'andamento di $v_o(t)$ in questo intervallo può essere rappresentato mediante la relazione approssimata

$$v_o(t) = V_M e^{-t/RC} \approx V_M \left(1 - \frac{t}{RC}\right)$$

- Quindi l'ampiezza V_r dell'oscillazione di v_o (detta anche **ripple**) vale

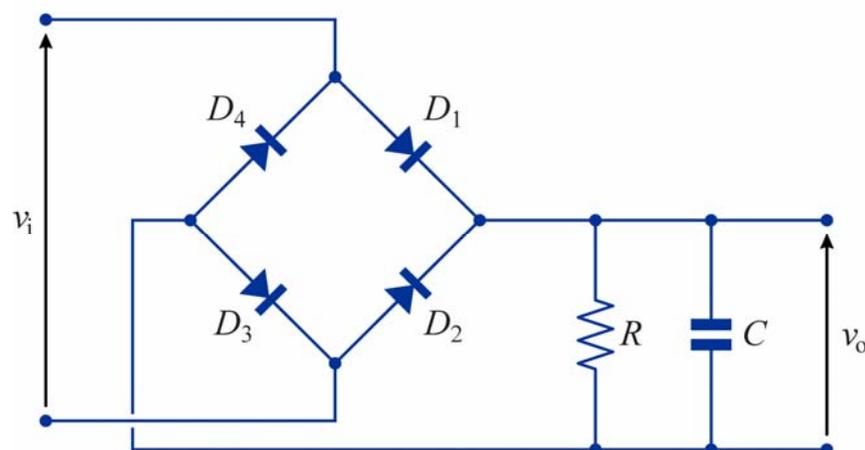
$$V_r = V_M - V_M \left(1 - \frac{T}{RC}\right) = \frac{V_M T}{RC}$$

37

Raddrizzatore con capacità di filtro

- In modo analogo è possibile trattare il caso di un raddrizzatore a doppia semionda con condensatore di filtro
- In questo caso l'intervallo di tempo tra due istanti in cui $v_o(t) = V_M$ è pari a $T/2$ quindi, a parità di condizioni, il ripple è pari alla metà di quello del raddrizzatore a singola semionda

$$V_r = \frac{V_M T}{2RC}$$

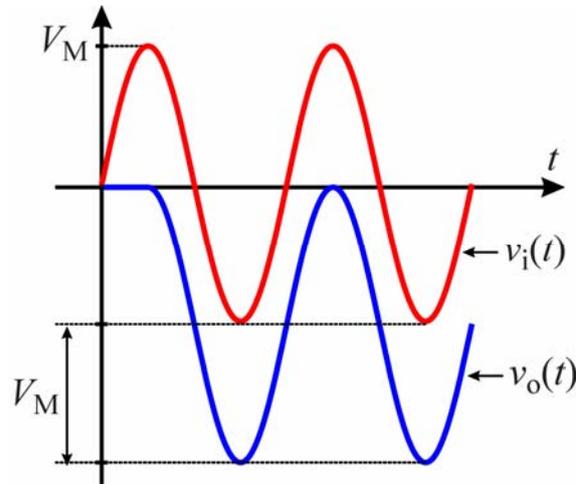
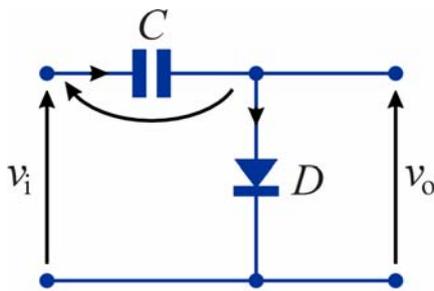


38

Clamper

- Si assume che il condensatore inizialmente sia scarico che il diodo possa essere considerato ideale
- Si applica una tensione di ingresso $v_i(t)$ sinusoidale di ampiezza V_M
- Inizialmente il diodo va in conduzione e il condensatore si carica finché la sua tensione raggiunge il valore V_M
- In seguito il condensatore rimane carico con tensione V_M e il diodo è sempre interdetto
- Quindi si ha

$$v_o(t) = v_i(t) - V_M$$

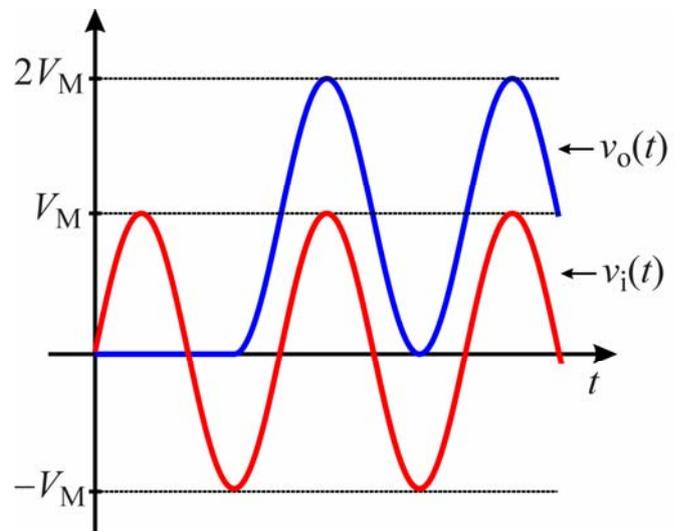
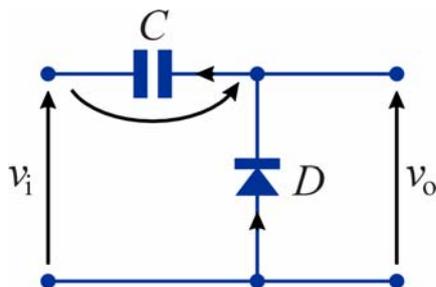


39

Clamper

- Se si inverte la polarità del diodo la tensione di uscita del clamper diviene

$$v_o(t) = v_i(t) + V_M$$

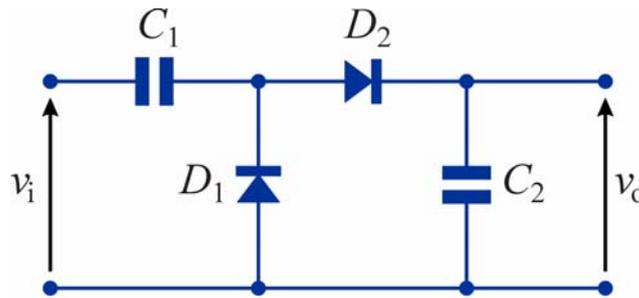


40

Duplicatore di tensione

- Il valore massimo della tensione di uscita del clamber rappresentato nella diapositiva precedente è $2V_M$
- Se si collega un rivelatore di picco all'uscita del clamber si ottiene un duplicatore di tensione, che fornisce in uscita una tensione costante pari al doppio dell'ampiezza della tensione di ingresso

$$v_o(t) = 2V_M$$



41

Duplicatore di tensione

- Inizialmente si ha un transitorio durante il quale
 - ♦ C_1 si carica attraverso D_1 e si scarica attraverso D_2
 - ♦ C_2 si carica progressivamente attraverso D_2 ma non si può scaricare
- In questo modo si raggiunge una condizione di regime in cui le tensioni di C_1 e C_2 sono, rispettivamente, V_M e $2V_M$ e i due diodi sono sempre interdetti
- Quindi le tensioni a regime sono

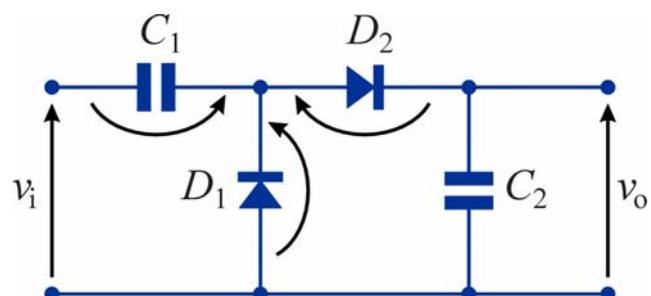
$$v_i(t) = V_M \cos(\omega t)$$

$$v_{C1} = V_M$$

$$v_{D1}(t) = V_M \cos(\omega t) + V_M$$

$$v_{D2}(t) = V_M \cos(\omega t) - V_M$$

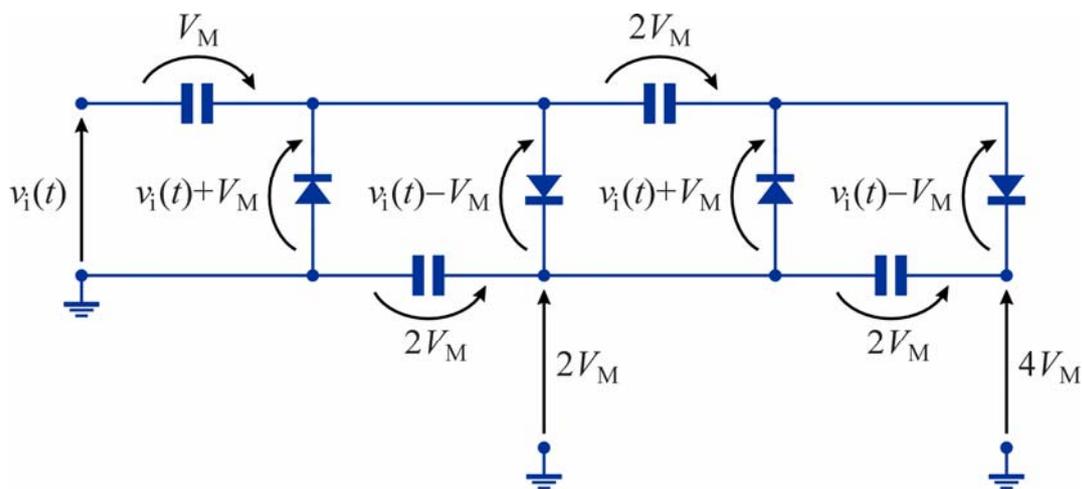
$$v_o = v_{C2} = 2V_M$$



42

Moltiplicatori di tensione

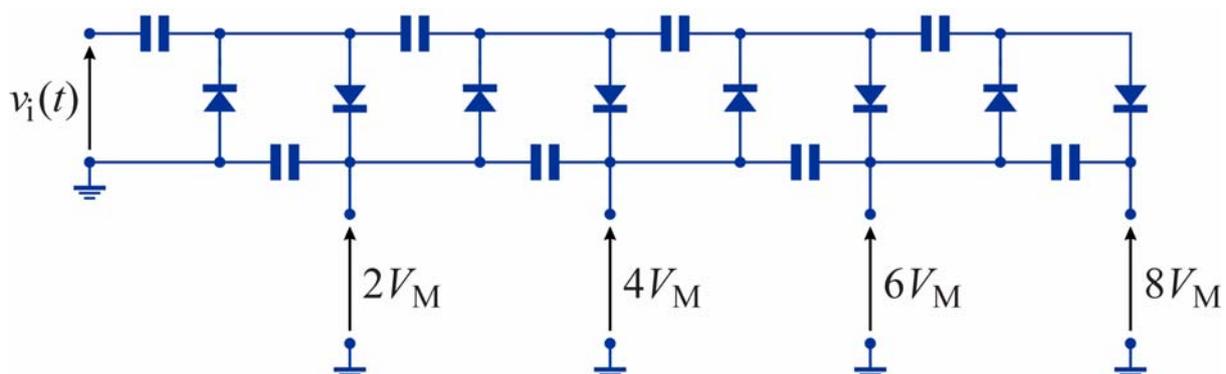
- Ai terminali del diodo D_2 del circuito precedente si ha una tensione che varia tra 0 e $-2V_M$
- Se questa tensione viene applicata ad un secondo stadio formato da un clamper e un rivelatore di picco, si ottiene in uscita una tensione costante pari a $4V_M$



43

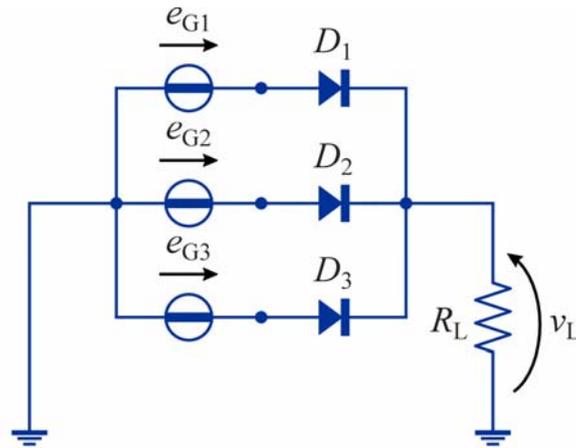
Moltiplicatori di tensione

- Collegando in cascata più celle identiche, costituite da un clamper e un rivelatore di picco, è possibile ottenere in uscita tensioni costanti con valori corrispondenti ai multipli pari dell'ampiezza della tensione di ingresso



44

Raddrizzatore trifase a semionda

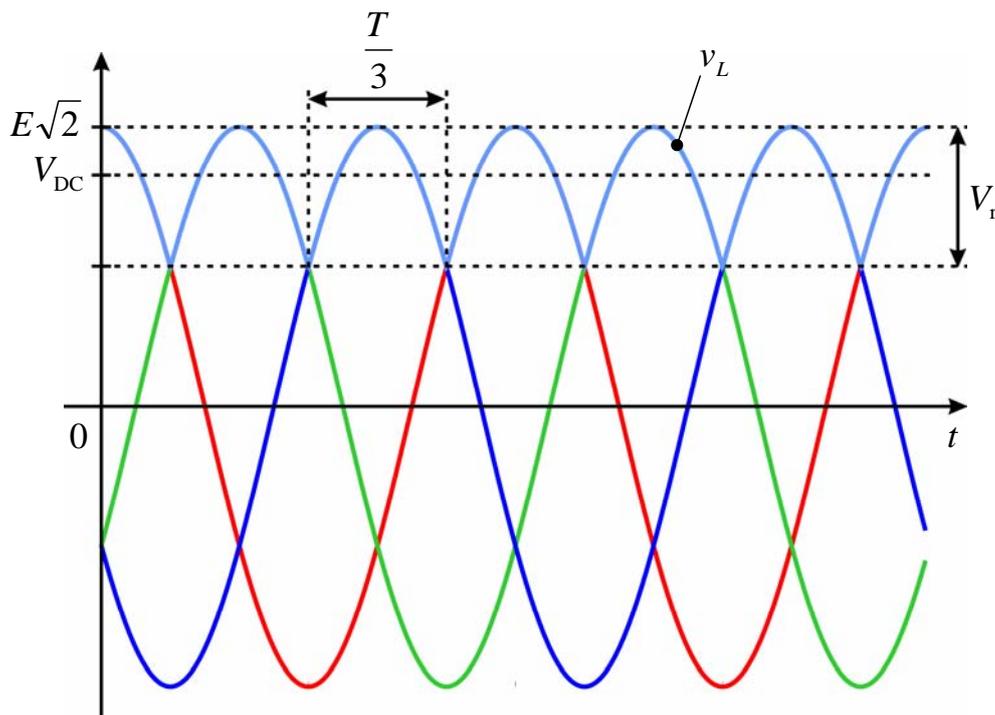


- Si assume che le tensioni dei generatori $e_{G1}(t)$, $e_{G2}(t)$, $e_{G3}(t)$ formino una terna simmetrica diretta
- In ogni istante è in conduzione il diodo al cui anodo è applicata la tensione stellata maggiore
- Ciascun diodo è in conduzione per un terzo di periodo
- La tensione di uscita ha andamento oscillante con frequenza pari a 3 volte la frequenza dei generatori

45

Raddrizzatore trifase a semionda

- Andamento della tensione di uscita (trascurando V_γ)



46

Raddrizzatore trifase a semionda

- Si indica con E il valore efficace delle tensioni stellate e con V il valore efficace delle tensioni concatenate
- Il valore medio della tensione di uscita è

$$V_{DC} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \frac{3}{T} \int_{-\frac{T}{6}}^{\frac{T}{6}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \cdot E = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \cdot V \approx 1.17 \cdot E \approx 0.675 \cdot V$$

- L'ampiezza del ripple è

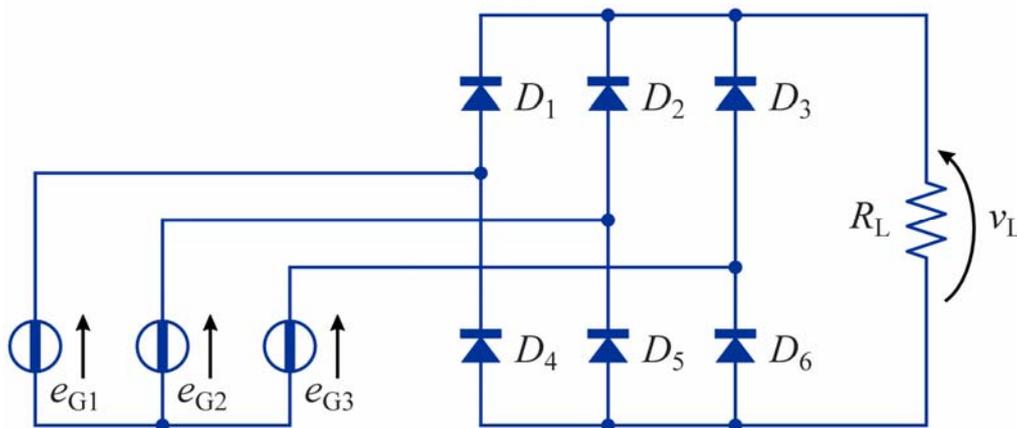
$$V_r = \sqrt{2} \cdot E \cdot \left[\cos(0) - \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \right] = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot E = \frac{\sqrt{6}}{6} \cdot V \approx 0.707 \cdot E \approx 0.408 \cdot V$$

- Quindi si ha

$$V_r = \frac{\pi\sqrt{3}}{9} \cdot V_{DC} \approx 0.605 \cdot V_{DC}$$

47

Raddrizzatore trifase a ponte

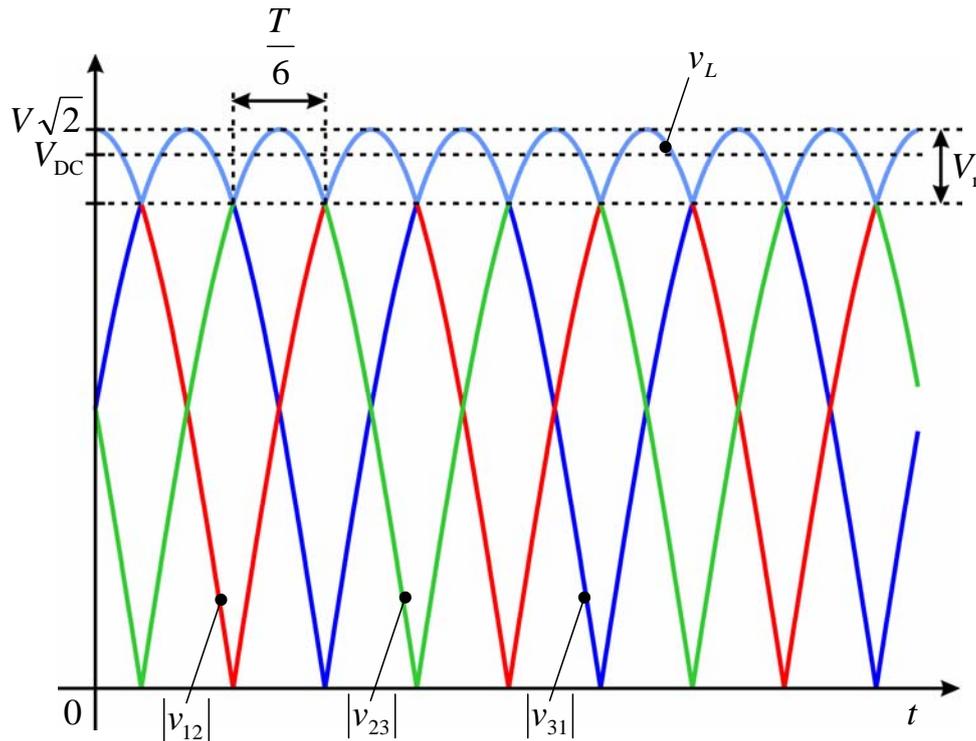


- Si assume che le tensioni dei generatori $e_{G1}(t)$, $e_{G2}(t)$, $e_{G3}(t)$ formino una terna simmetrica diretta
- In ogni istante sono in conduzione solo il diodo della terna superiore (D_1, D_2, D_3) al cui anodo è applicata la tensione stellata maggiore e il diodo della terna inferiore (D_4, D_5, D_6) al cui catodo è applicata la tensione stellata minore

48

Raddrizzatore trifase a ponte

- Andamento della tensione di uscita (trascurando V_γ)



49

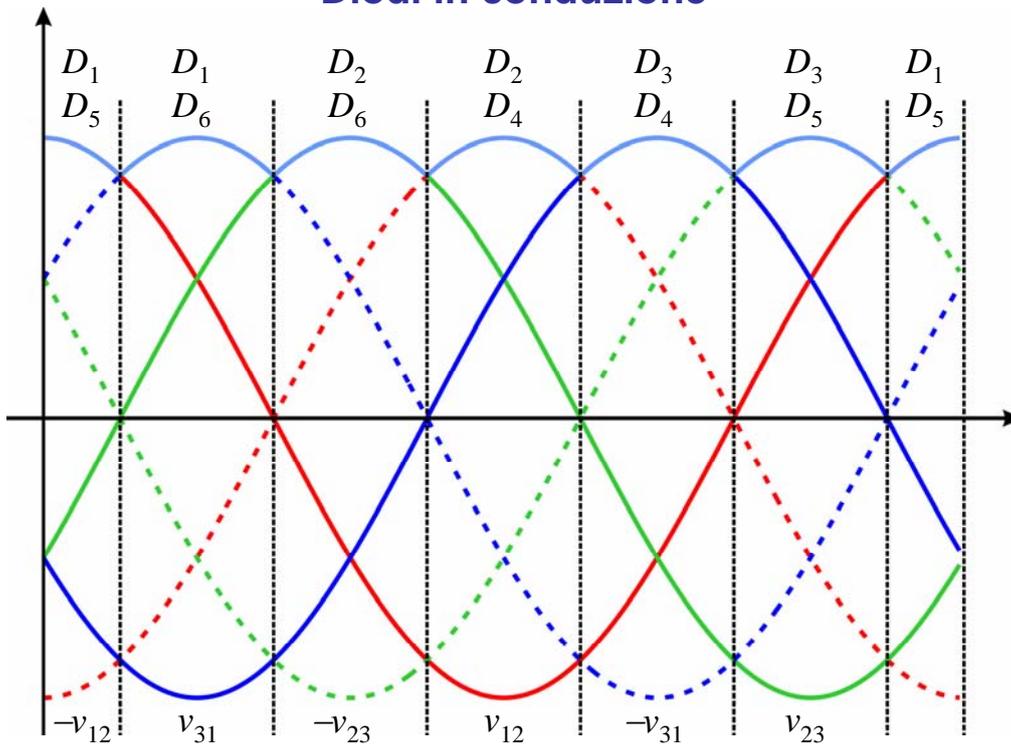
Raddrizzatore trifase a ponte

- In ogni istante la coppia di diodi in conduzione è quella per cui la tensione concatenata (con positivo corrispondente all'anodo del diodo della terna superiore) risulta maggiore
- A metà dell'intervallo in cui è in conduzione uno dei diodi della terna superiore avviene una commutazione tra due diodi della terna inferiore e viceversa
- Complessivamente ciascuno dei diodi rimane in conduzione per un terzo del periodo, mentre ciascuna coppia è in conduzione per un sesto del periodo
- L'andamento della tensione in uscita (trascurando V_γ) coincide con l'involuppo dei valori assoluti delle tensioni concatenate
- Quindi si ha un andamento oscillante con frequenza fondamentale pari a 6 volte la frequenza delle tensioni dei generatori

50

Raddrizzatore trifase a ponte

Diodi in conduzione



51

Raddrizzatore trifase a ponte

- Si indica con V il valore efficace delle tensioni concatenate
- Il valore medio della tensione di uscita è

$$V_{DC} = \sqrt{2} \cdot V \cdot \frac{6}{T} \int_{-\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V \approx 1.35 \cdot V$$

- L'ampiezza del ripple è

$$V_r = \sqrt{2} \cdot V \cdot \left[\cos(0) - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] = \sqrt{2} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \approx 0.189 \cdot V$$

- Quindi si ha

$$V_r = \frac{\pi}{6} (\sqrt{3} - 2) \cdot V_{DC} \approx 0.140 \cdot V_{DC}$$

52