

**Corso di
ELETTRONICA INDUSTRIALE**

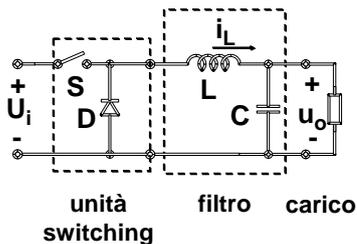
*“Funzionamento discontinuo del
convertitore buck.
Caratteristiche di controllo e d’uscita”*

Argomenti trattati

**Analisi del funzionamento
discontinuo del convertitore buck**

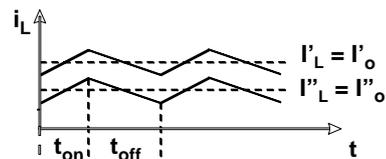
- Equazioni fondamentali
- Forme d’onda
- Caratteristiche di controllo e di uscita
- Funzionamento con carico resistivo

**Schema del convertitore Buck
(Step-down)**



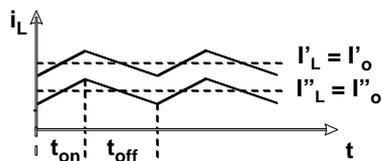
Convertitore Buck

**Passaggio dal funzionamento continuo
a quello discontinuo**



Se cambia il carico, a parità di tensione di uscita, cambia la corrente di uscita. Però δ resta costante.

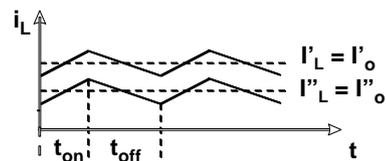
Convertitore Buck
**Passaggio dal funzionamento continuo
a quello discontinuo**



$$U'_o = U''_o = \delta U_i \quad I_L = I_o$$

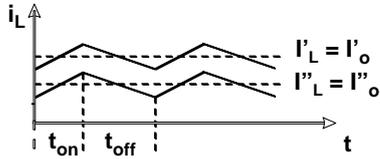
Convertitore Buck

**Passaggio dal funzionamento continuo
a quello discontinuo**



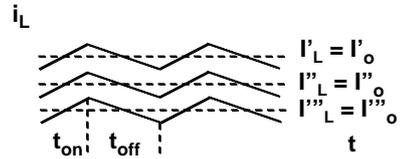
Anche l’ondulazione di corrente resta costante

Convertitore Buck
Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



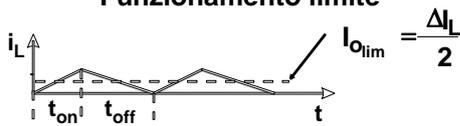
$$\Delta I'_L = \Delta I''_L \quad \Delta I_L = f(U_o) = \frac{U_i \delta (1 - \delta)}{f_s L}$$

Convertitore Buck
Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



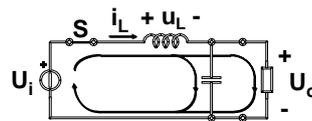
Se il carico si riduce ulteriormente, la corrente i_L può annullarsi, dando luogo al funzionamento discontinuo

Funzionamento limite



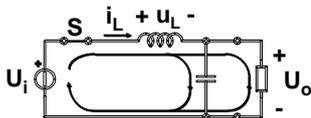
La corrente i_L si annulla esattamente nell'istante finale della fase di OFF
Se $I_o < I_{o\text{lim}}$ il funzionamento diventa discontinuo (DCM - Discontinuous Conduction Mode), cioè i_L rimane nulla per una certa porzione di t_{off}

Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}



Valgono le equazioni del modo continuo, con $I_{L\text{min}} = 0$

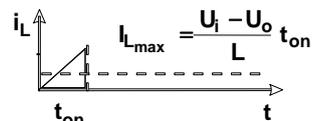
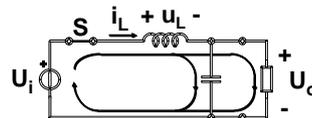
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}



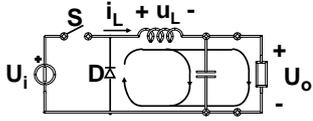
$$u_L = U_i - U_o \quad \Rightarrow \quad i_L(t) = \frac{U_i - U_o}{L} t$$

$$I_{L\text{max}} = \frac{U_i - U_o}{L} t_{\text{on}}$$

Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}

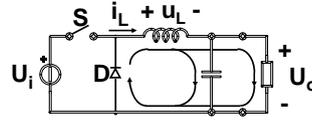


**Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}**



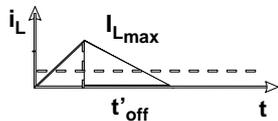
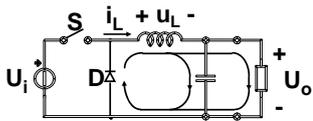
Valgono le equazioni del modo continuo, fino all'istante t'_{off} in cui $i_L = 0$

**Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}**

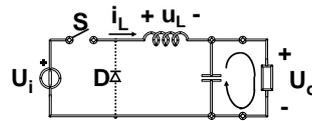


$$U_L = -U_o \Rightarrow i_L(t) = I_{Lmax} \frac{U_o}{L} t$$

**Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}**

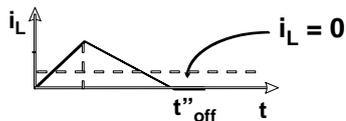
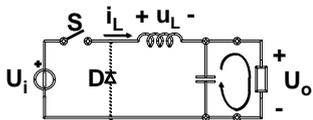


**Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t''_{off}**

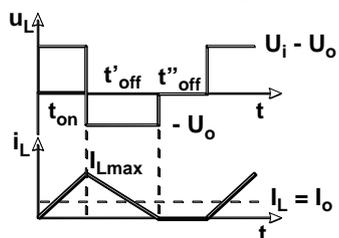


La corrente i_L , non potendo invertirsi, rimane nulla fino alla successiva chiusura di S

**Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t''_{off}**



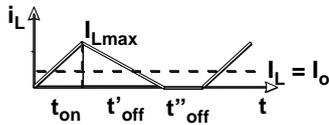
Forme d'onda complessive



A regime:

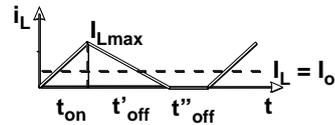
$$\Delta I_{Lon} = \Delta I_{Loff} \Rightarrow (U_i - U_o) t_{on} = U_o t'_{off}$$

Equazioni risolutive



- a) $(U_i - U_o) t_{on} = U_o t'_{off}$
 b) $I_{Lmax} = \frac{U_i - U_o}{L} t_{on} \Rightarrow \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + 2f_s L I_o}$
 c) $I_o = I_L = I_{Lmax} \frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_s}$

Equazioni risolutive



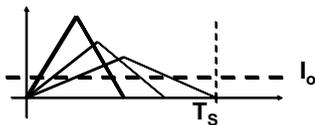
- Nota 1:**
 La caratteristica di controllo è non-lineare e dipende dalla corrente d'uscita I_o
- $$\frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + 2f_s L I_o}$$

Nota 2 (per il dimensionamento):

$$I_o = I_L = I_{Lmax} \frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_s}$$

$$I_{Lmax} = 2 \cdot I_o \frac{T_s}{t_{on} + t'_{off}} \quad I_{Lmax} = \frac{U_o}{L} t'_{off}$$

A parità di I_o , più l'intermittenza è spinta (L minore) più cresce I_{Lmax}



Nota 2 (per il dimensionamento):

$$I_o = I_L = I_{Lmax} \frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_s}$$

$$I_{Lmax} = 2 \cdot I_o \frac{T_s}{t_{on} + t'_{off}} \quad I_{Lmax} = \frac{U_o}{L} t'_{off}$$

A parità di I_o , più l'intermittenza è spinta (t'_{off} ridotto) più cresce I_{Lmax}

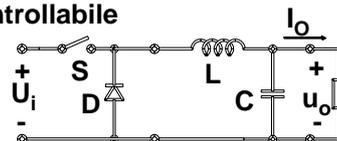
L'intermittenza aumenta le sollecitazioni di corrente del diodo e dell'interruttore

NOTA 3:
 A vuoto ($I_o = 0$) il convertitore non è controllabile

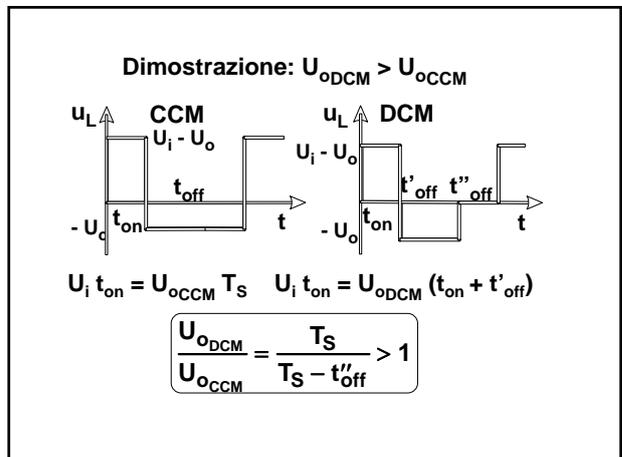
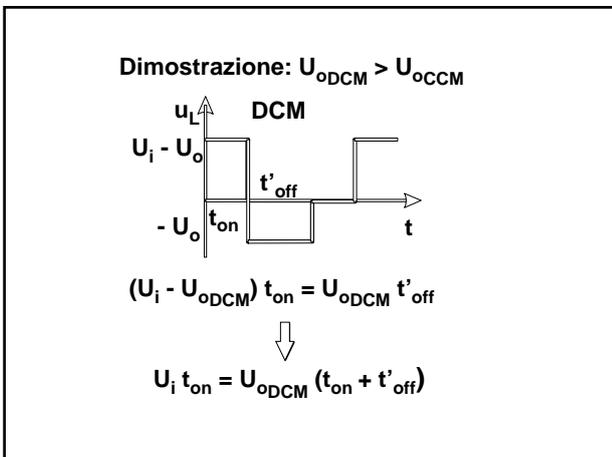
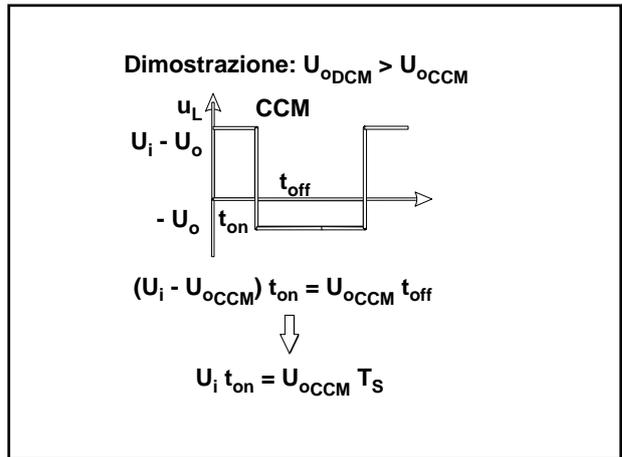
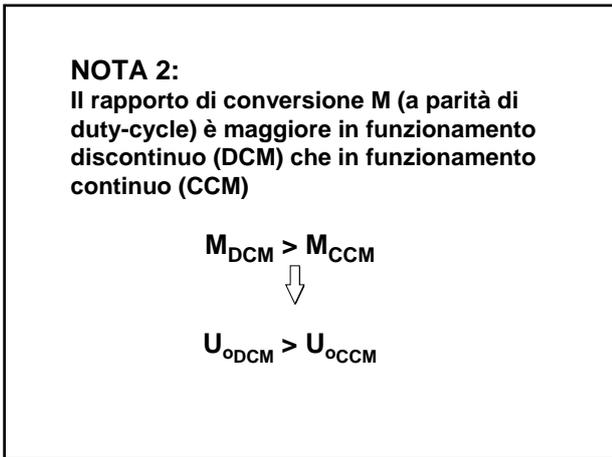
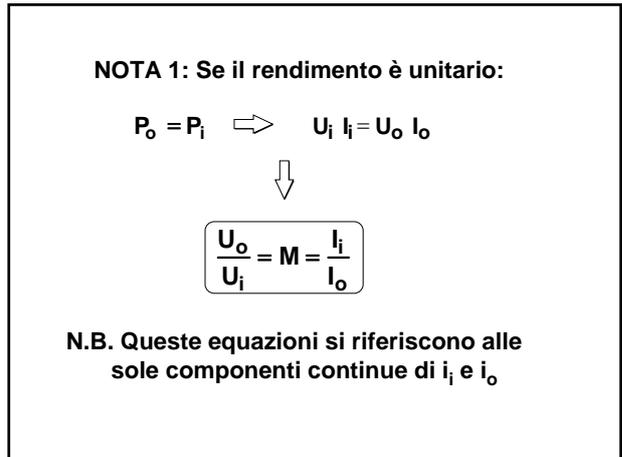
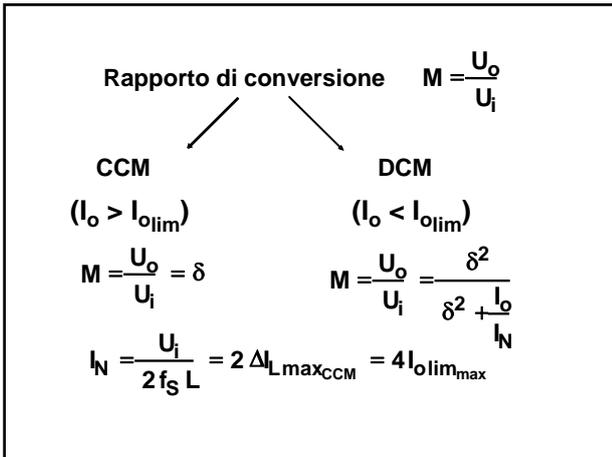
$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{2f_s L I_o}{U_i}}$$

Se $I_o \rightarrow 0$ allora $U_o \rightarrow U_i$ per ogni δ

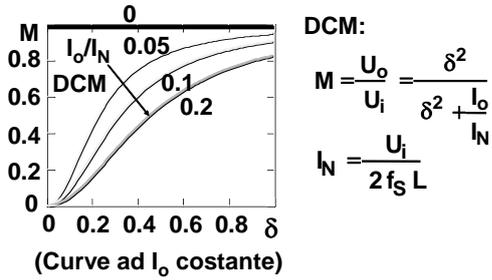
NOTA 3:
 A vuoto ($I_o = 0$) il convertitore non è controllabile



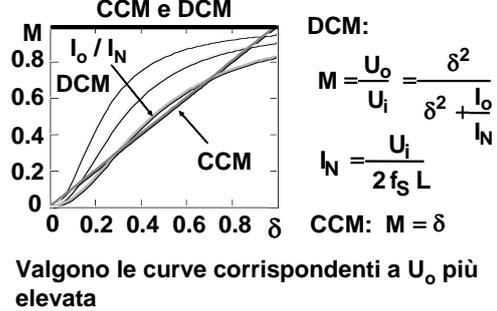
Se $I_o = 0$ non c'è assorbimento di energia dal carico. L'energia fornita dall'alimentazione si accumula nel condensatore C, la cui tensione U_o cresce fino a stabilizzarsi al valore U_i .



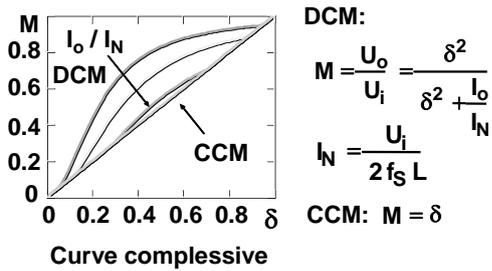
Caratteristiche di controllo $M = f(\delta)$



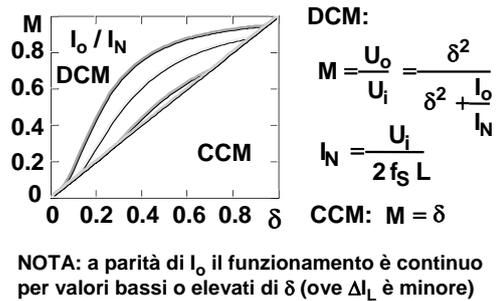
Caratteristiche di controllo $M = f(\delta)$



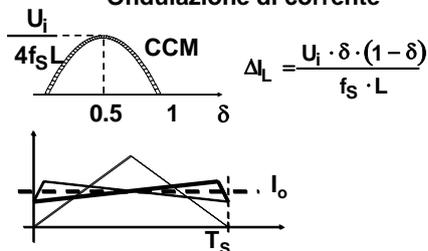
Caratteristiche di controllo $M = f(\delta)$



Caratteristiche di controllo $M = f(\delta)$

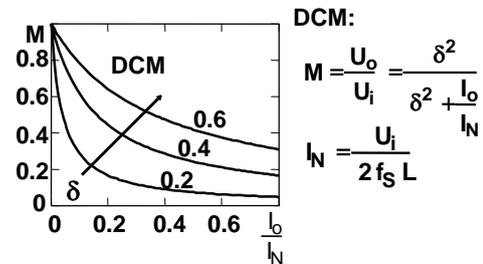


Ondulazione di corrente

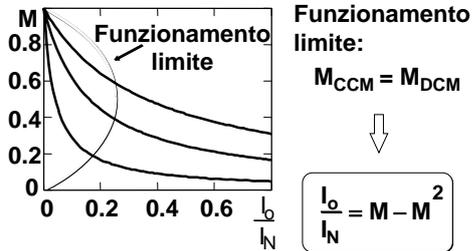


A parità di I_o l'intermittenza si ha per elevati valori di ΔI_L , cioè con δ nell'intorno di 0.5

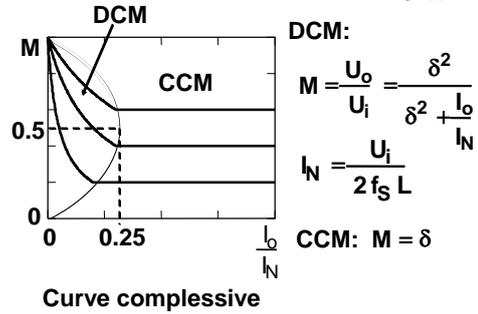
Caratteristiche di uscita $M = f(I_o/I_N)$



Caratteristiche di uscita $M = f(I_o/I_N)$



Caratteristiche di uscita $M = f(I_o/I_N)$



Funz. con carico resistivo: $I_o = \frac{U_o}{R_o}$

CCM $\Rightarrow M = \frac{U_o}{U_i} = \delta$

DCM $\Rightarrow M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{2f_s L I_o}{U_i}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4k}{\delta^2}}}$

$$k = \frac{2f_s L}{R_o}$$

Funzionamento con carico resistivo

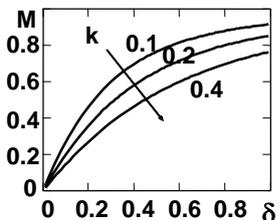
Caso limite tra CCM e DCM

$$M_{CCM} = M_{DCM} \Rightarrow k_{lim} = 1 - \delta$$

- Per avere funzionamento continuo per un certo δ basta imporre $k > k_{lim}$, ovvero $R_o < 2f_s L / (1 - \delta)$
- Per avere funzionamento continuo in ogni condizione ($0 < \delta < 1$) si pone $k > 1$ ($R_o < 2f_s L$)
- Connettendo un carico "zavorra" (bleeder) che soddisfi la condizione $R_o < 2f_s L$ si ottiene un funzionamento sempre continuo

Carico resistivo

Caratteristiche di controllo $M = f(\delta)$



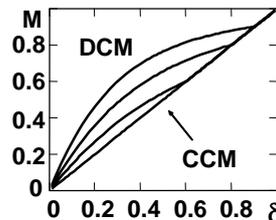
DCM:

$$M = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4k}{\delta^2}}}$$

$$k = \frac{2f_s L}{R_o}$$

Carico resistivo

Caratteristiche di controllo $M = f(\delta)$



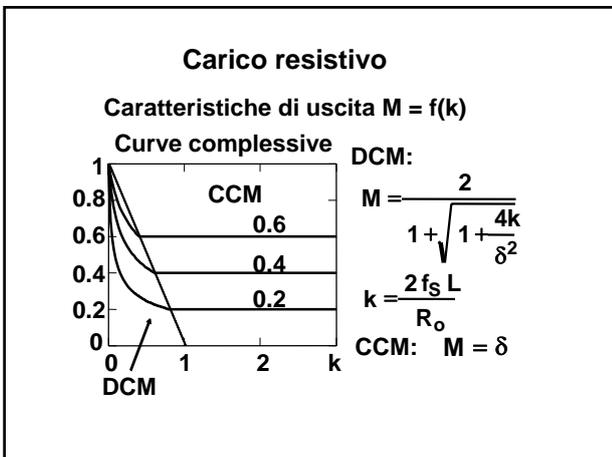
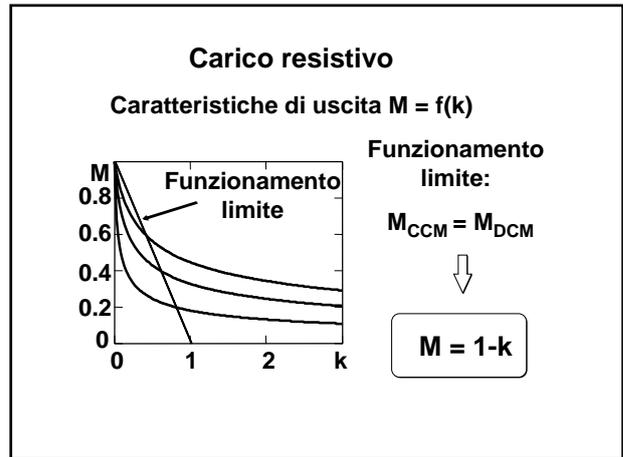
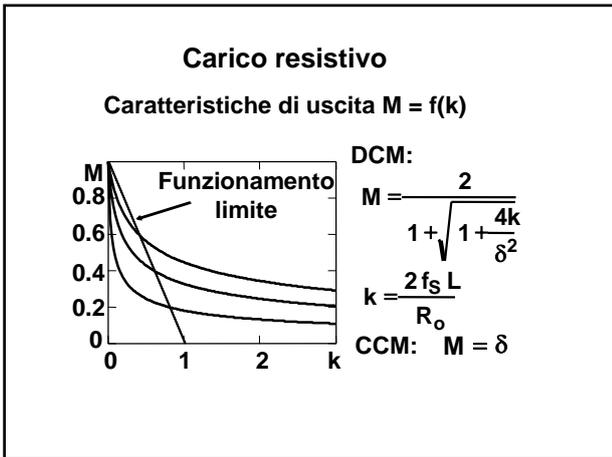
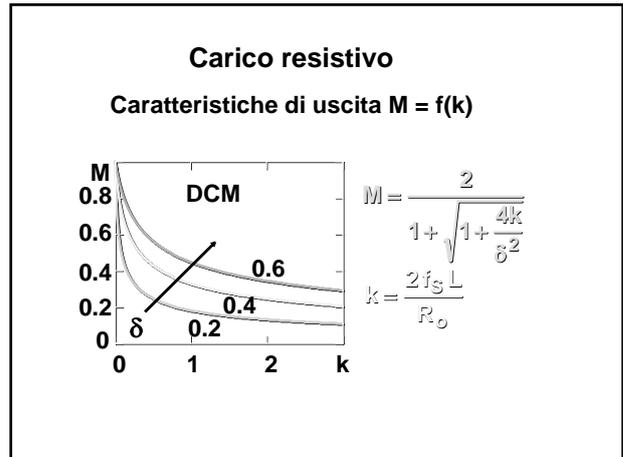
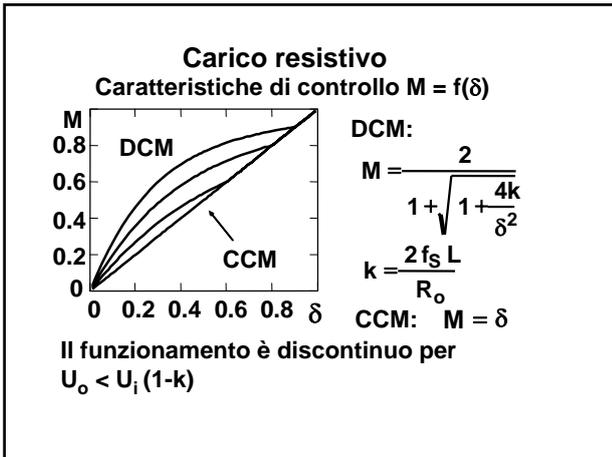
DCM:

$$M = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4k}{\delta^2}}}$$

$$k = \frac{2f_s L}{R_o}$$

CCM: $M = \delta$

Curve compressive



- ### Conclusioni
- La caratteristica di controllo del convertitore buck risulta lineare solo in CCM
 - In DCM la caratteristica di controllo è nonlineare e dipende dalla corrente di carico
 - Il convertitore non è controllabile a vuoto
 - Il controllo della tensione d'uscita può essere garantito applicando un carico zavorra
 - Un opportuno dimensionamento del carico zavorra e dell'induttanza di filtro garantisce il funzionamento CCM in ogni condizione