Corso di
ELETTRONICA INDUSTRIALE

"Funzionamento discontinuo del convertitore buck. Caratteristiche di controllo e d'uscita"

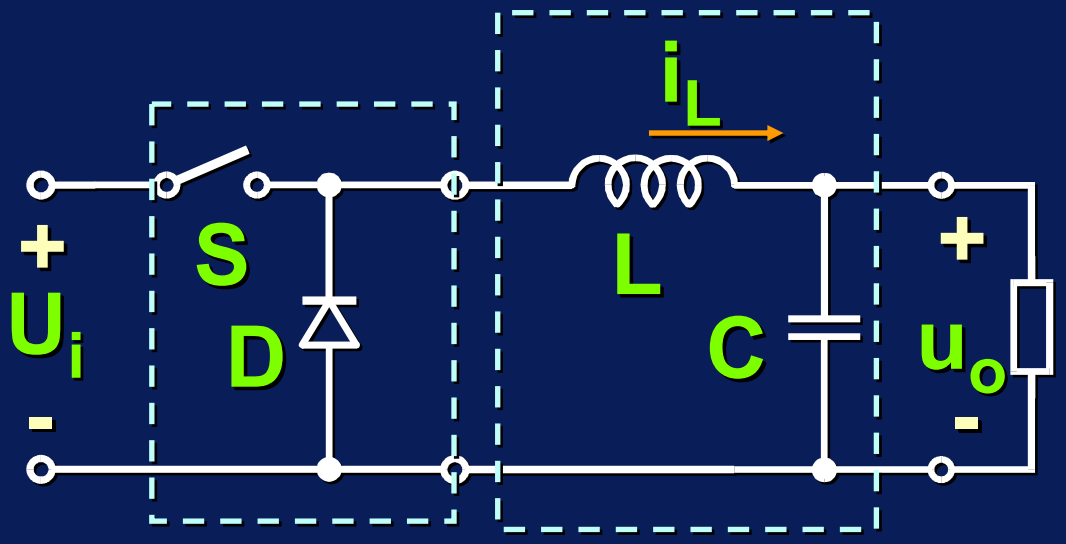
Argomenti trattati

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)



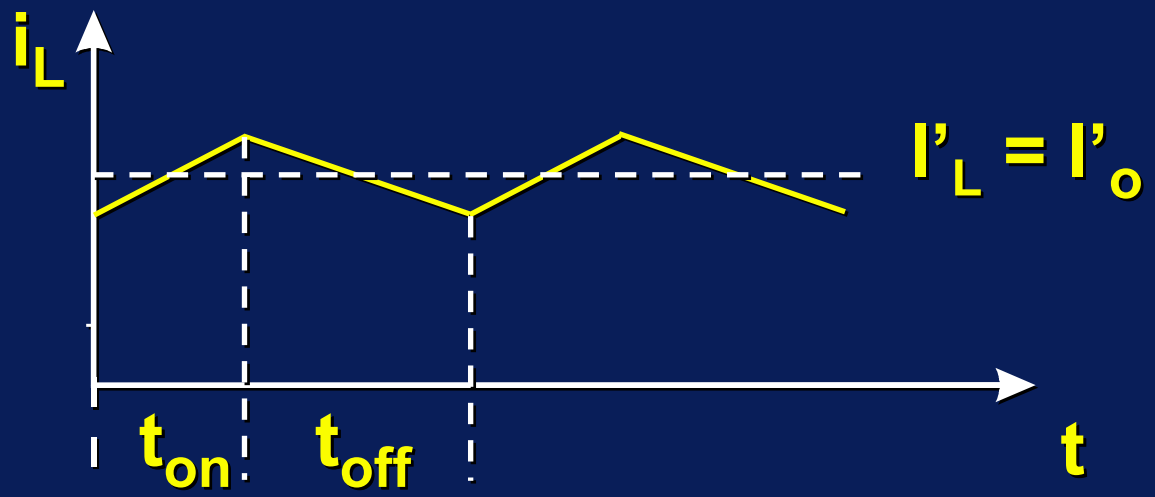
unità switching

filtro

carico

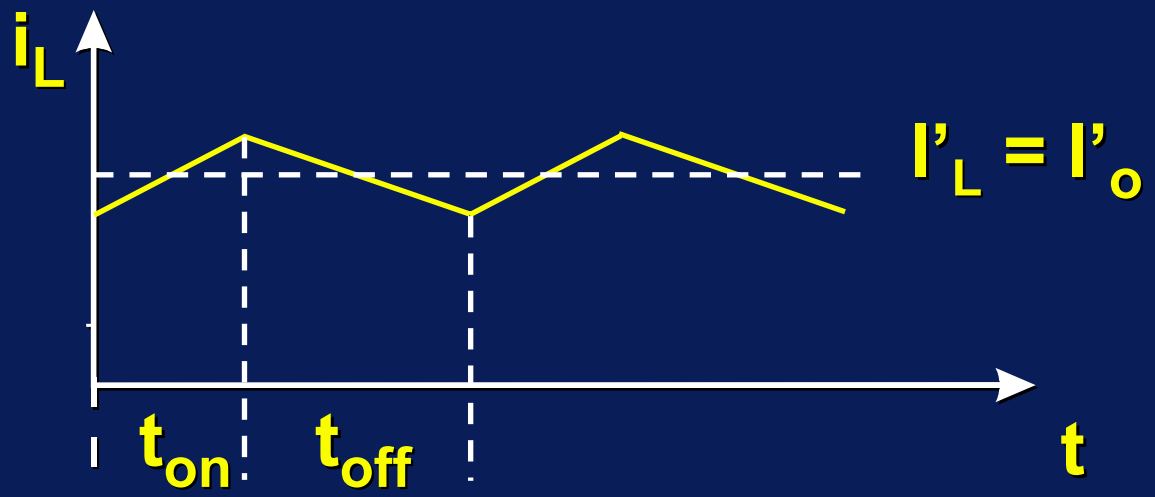
Convertitore Buck

Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



Convertitore Buck

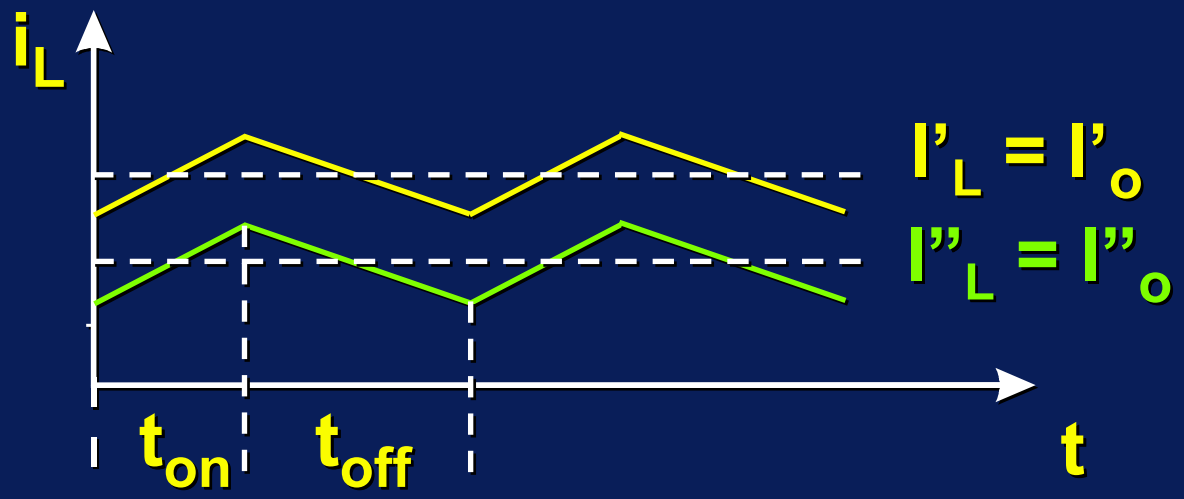
Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



Se cambia il carico, a parità di tensione di uscita, cambia la corrente di uscita.

Convertitore Buck

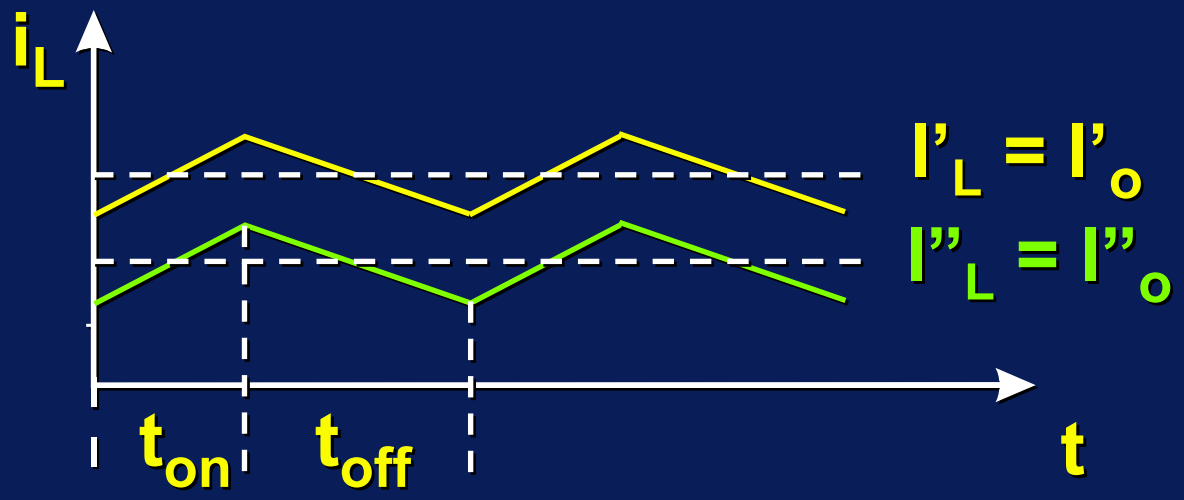
Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



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

Convertitore Buck

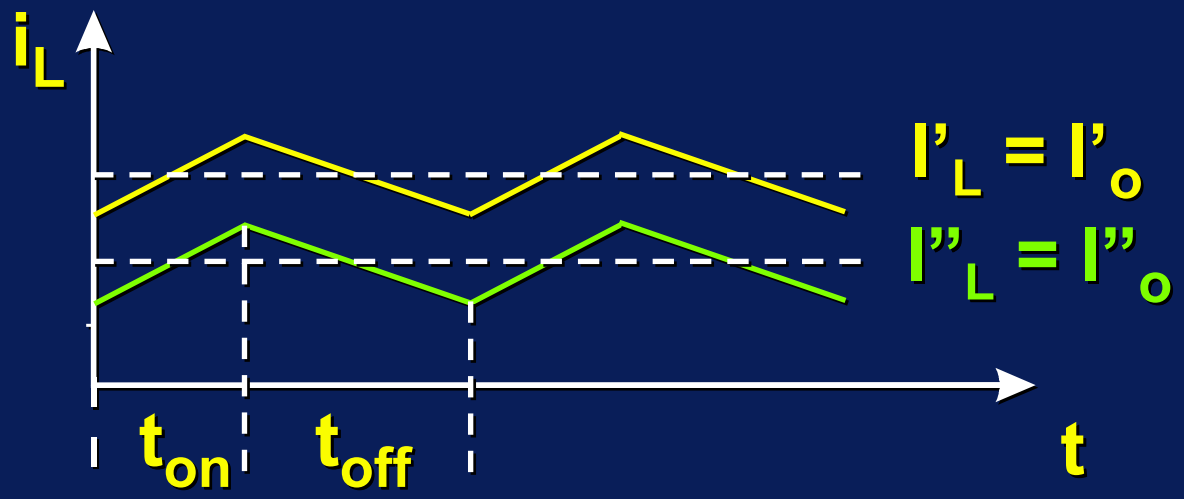
Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



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

Convertitore Buck

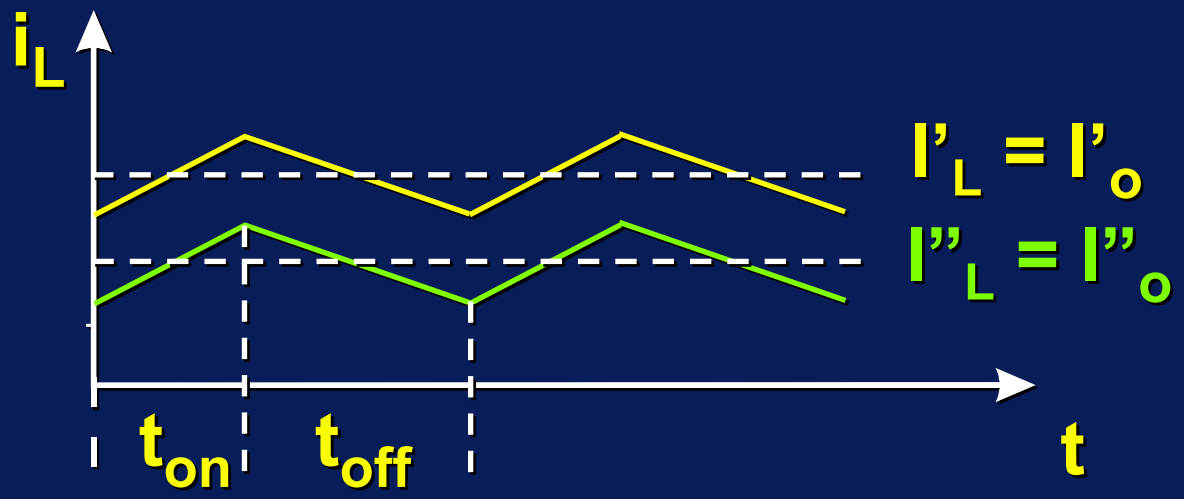
Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



Anche l'ondulazione di corrente resta costante

Convertitore Buck

Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo

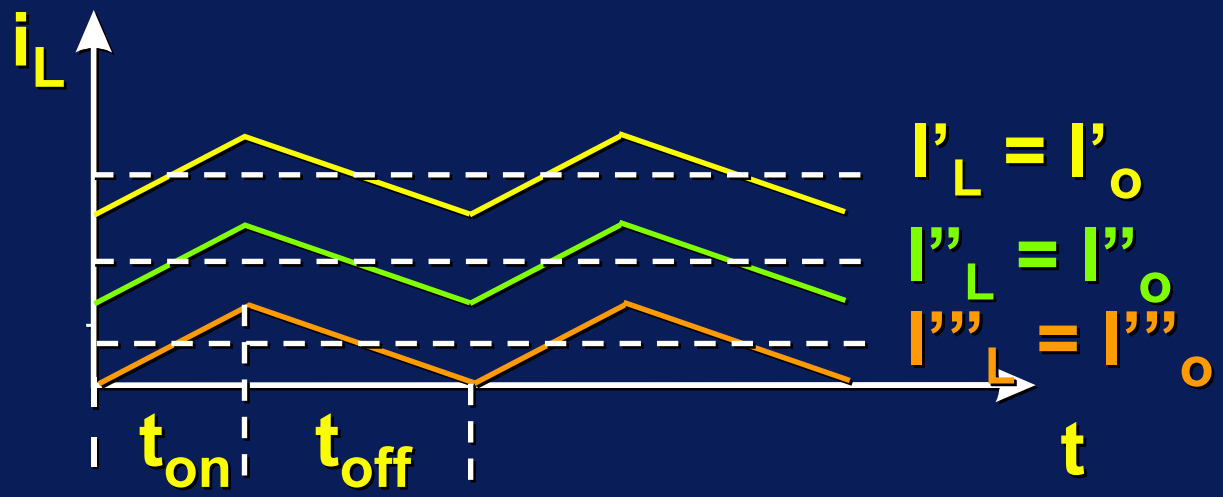


$$\Delta I'_L = \Delta I''_L$$

$$\Delta I_L = f(U_o) = \frac{U_i\,\delta(1-\delta)}{f_S\,L}$$

Convertitore Buck

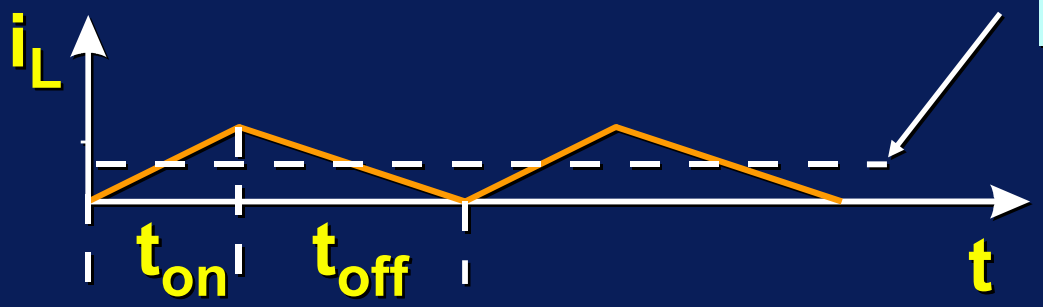
Passaggio dal funzionamento continuo a quello discontinuo



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

Funzionamento limite

Funzionamento limite



$$I_{o_{lim}} = \frac{\Delta I_L}{2}$$

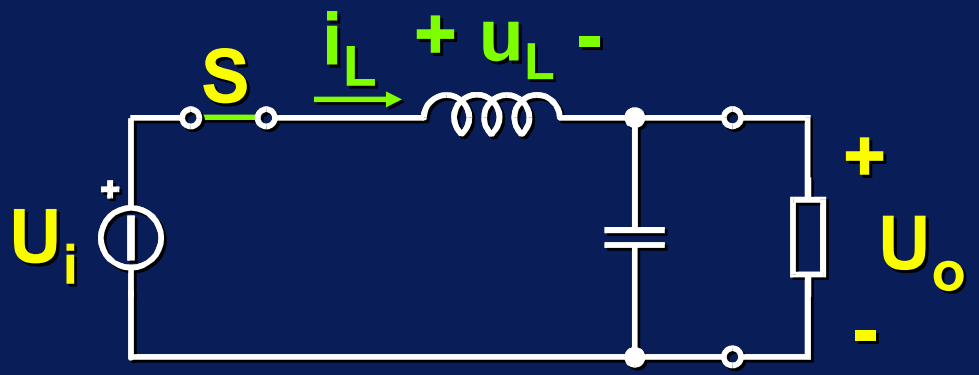
La corrente i_L si annulla esattamente nell'istante finale della fase di **OFF**

Se $I_o < I_{o_{lim}}$ il funzionamento diventa discontinuo (**DCM** - **D**iscontinuous **C**onduction **M**ode), cioè i_L rimane nulla per una certa porzione di t_{off}

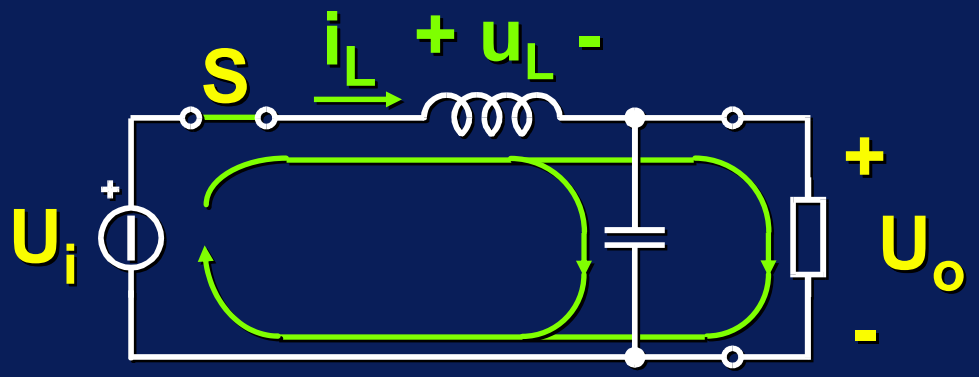
Studio del funzionamento discontinuo

Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}

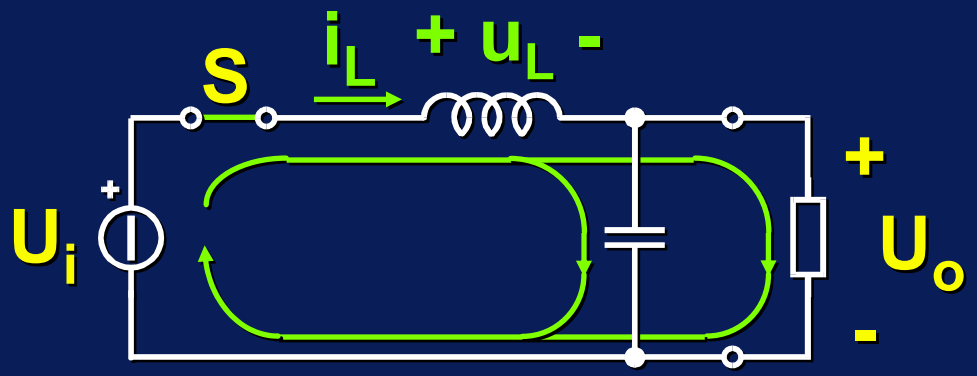
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}



Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}

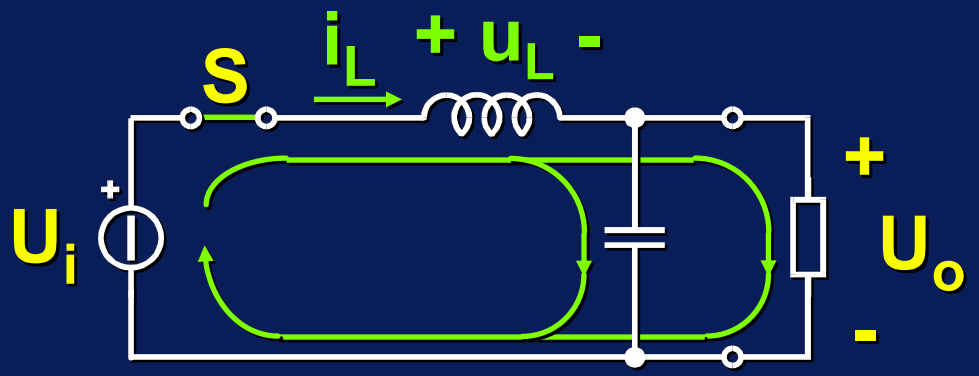


Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}



Valgono le equazioni del modo continuo, con $I_{L_{min}} = 0$

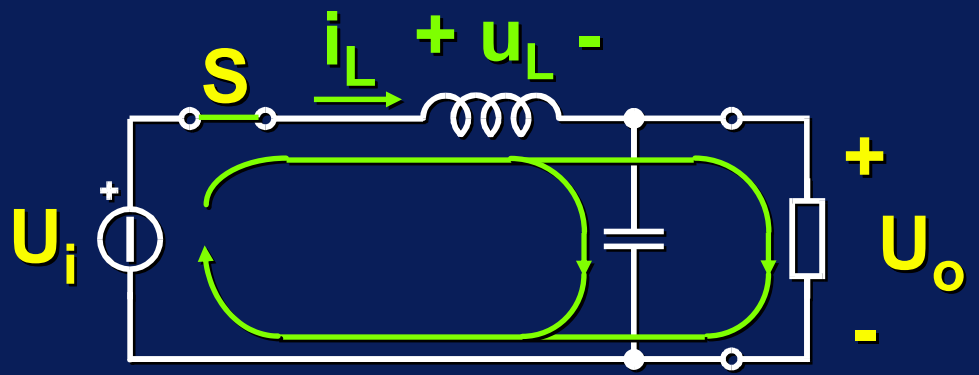
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}

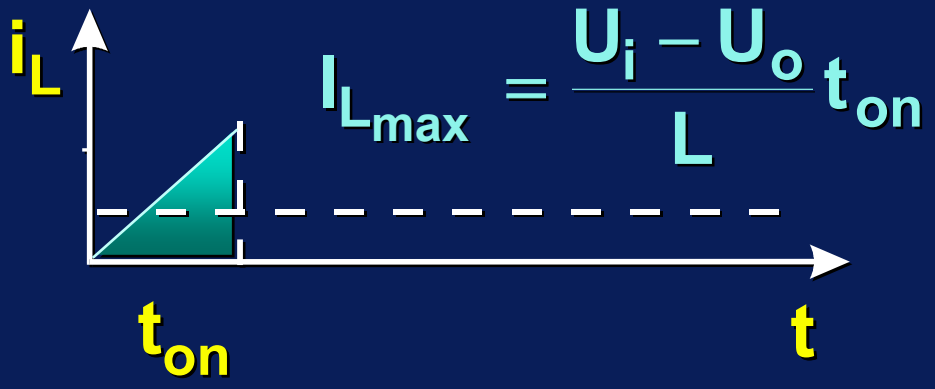


$$u_L = U_i - U_o \quad \Rightarrow \quad i_L(t) = \frac{U_i - U_o}{L} t$$

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

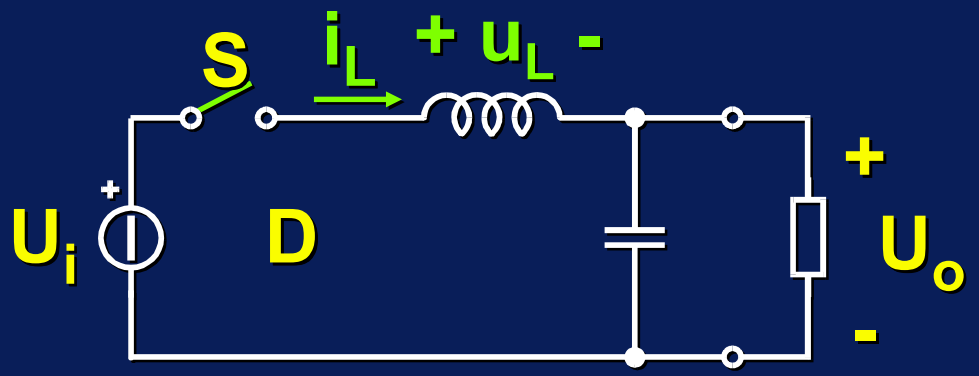
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t_{on}



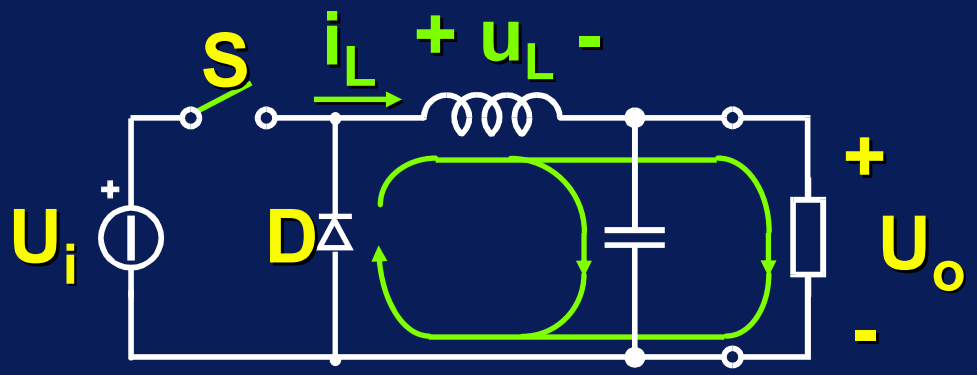


Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}

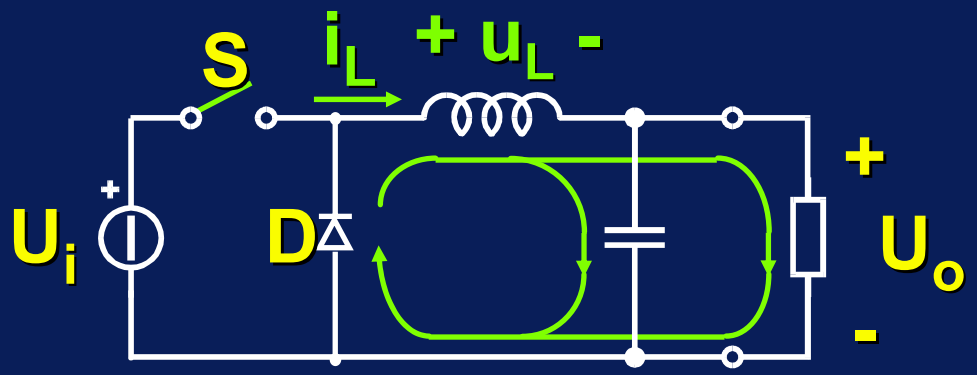
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}



Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}

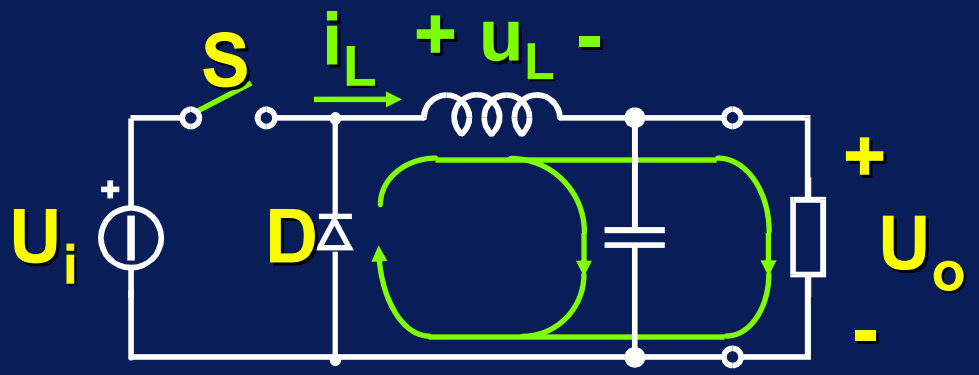


Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}



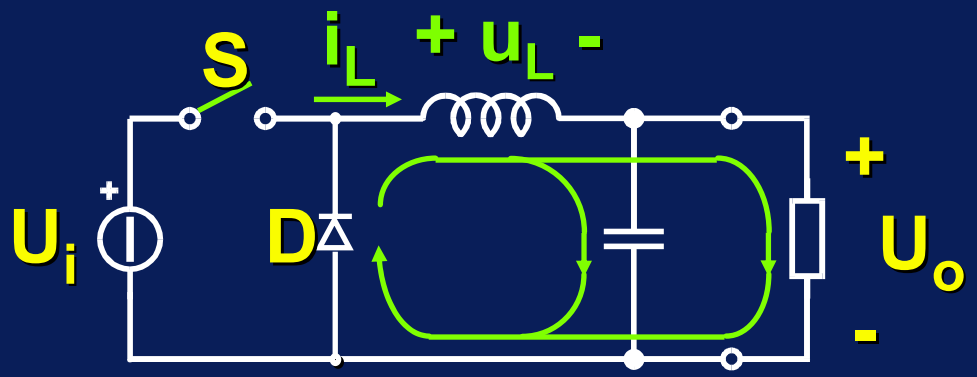
Valgono le equazioni del modo continuo, fino all'istante t'_{off} in cui $i_L = 0$

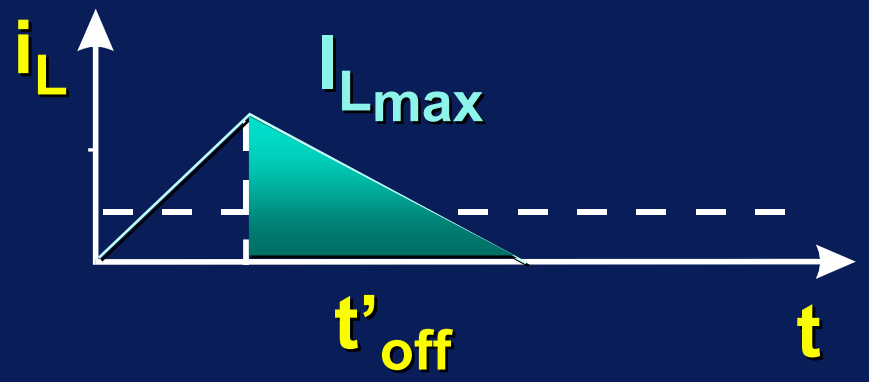
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}



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

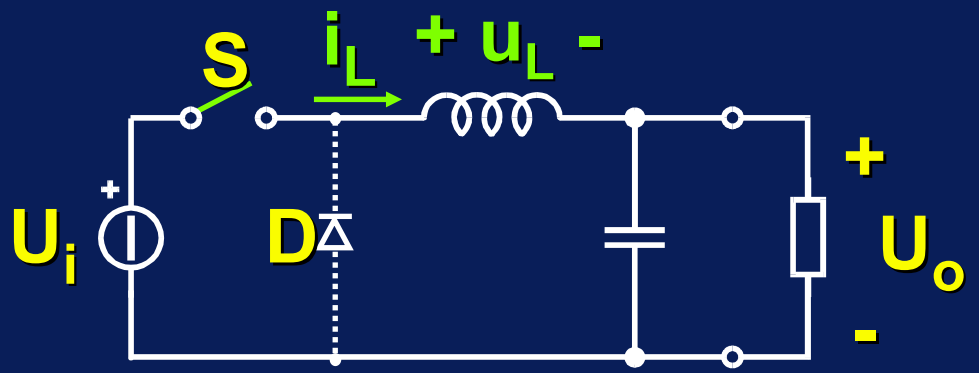
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t'_{off}





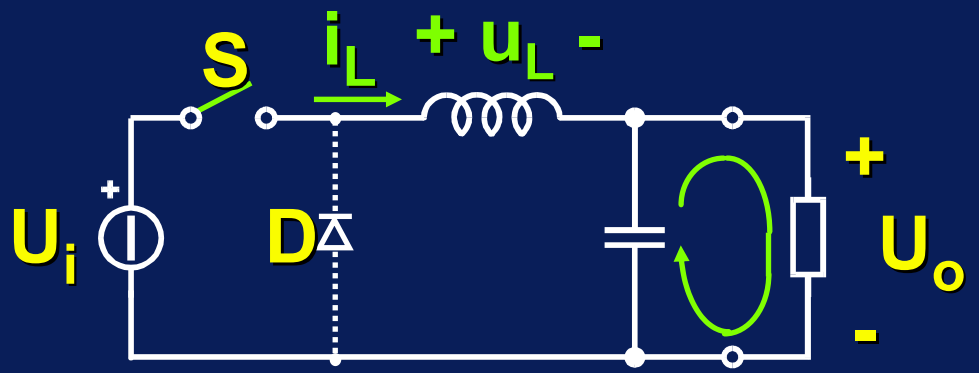
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t''_{off}

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



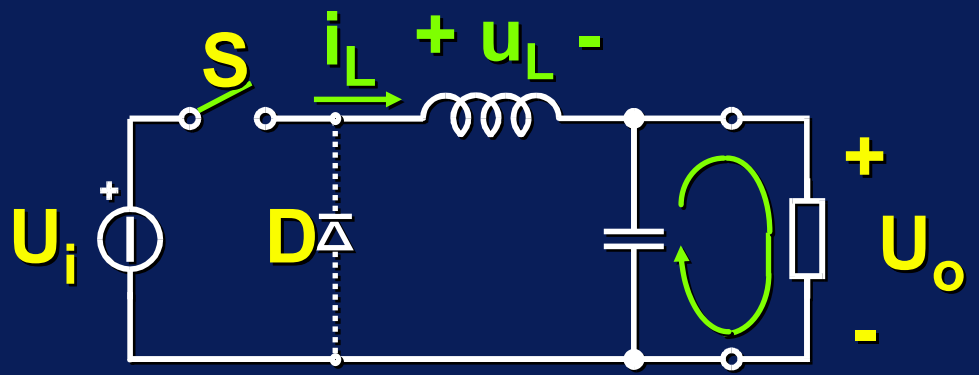
La corrente i_L, non potendo invertirsi, rimane nulla fino alla successiva chiusura di S

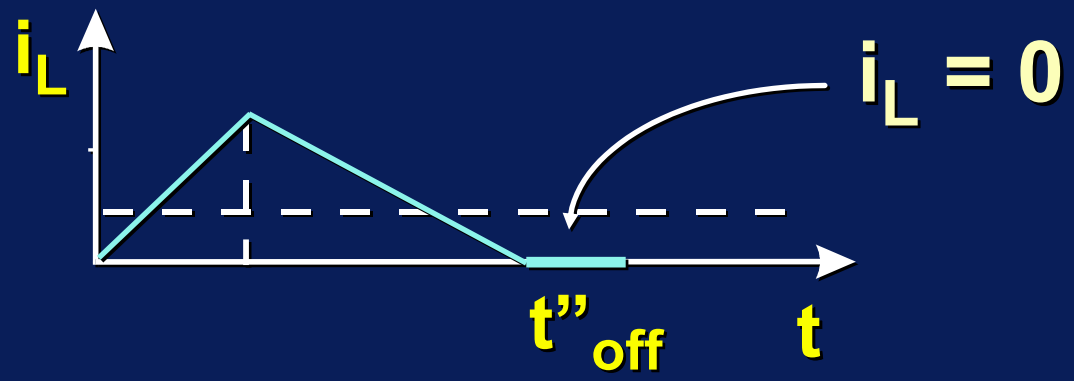
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t''_{off}



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

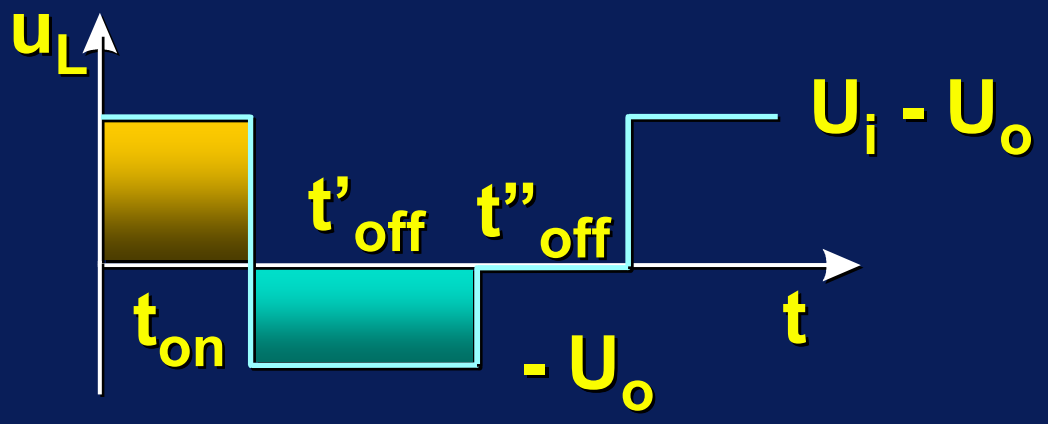
Studio del funzionamento discontinuo
Intervallo t''_{off}



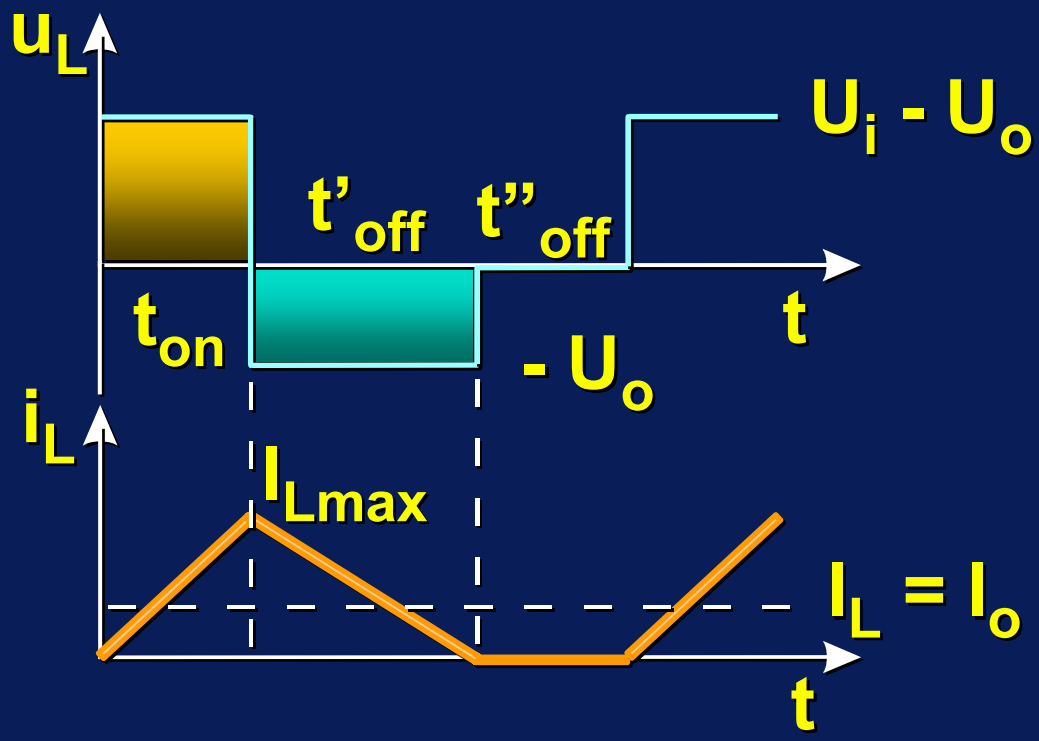


Forme d’onda complessive

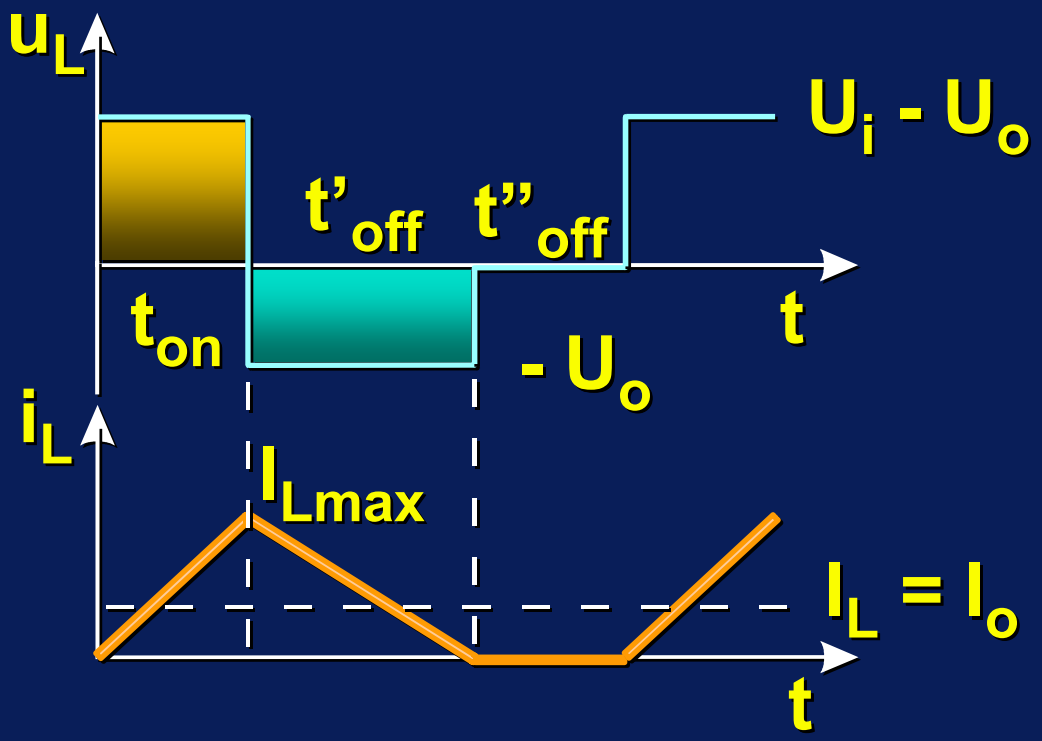
Forme d'onda complessive



Forme d'onda complessive



Forme d'onda complessive

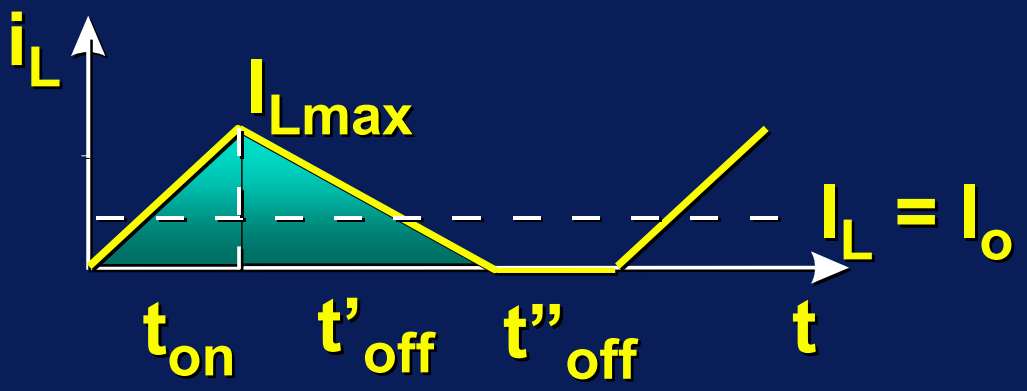


A regime:

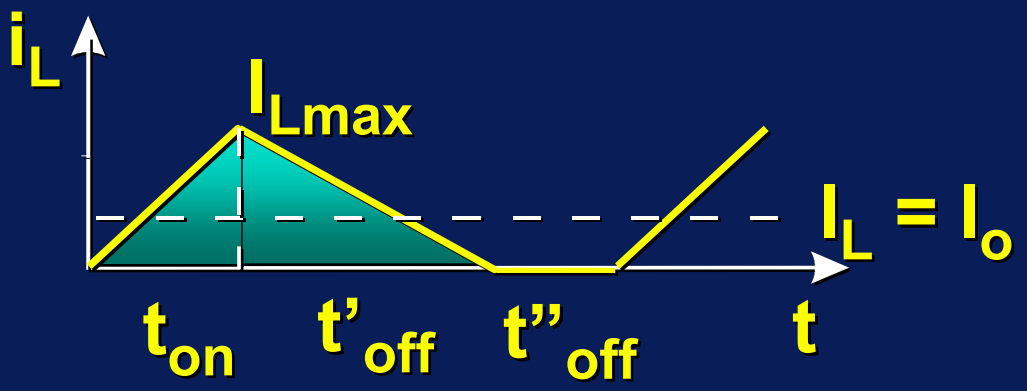
$$\Delta I_{Lon} = \Delta I_{Loff} \Rightarrow (U_i - U_o)\, t_{on} = U_o\, t'_{off}$$

Equazioni risolutive

Equazioni risolutive

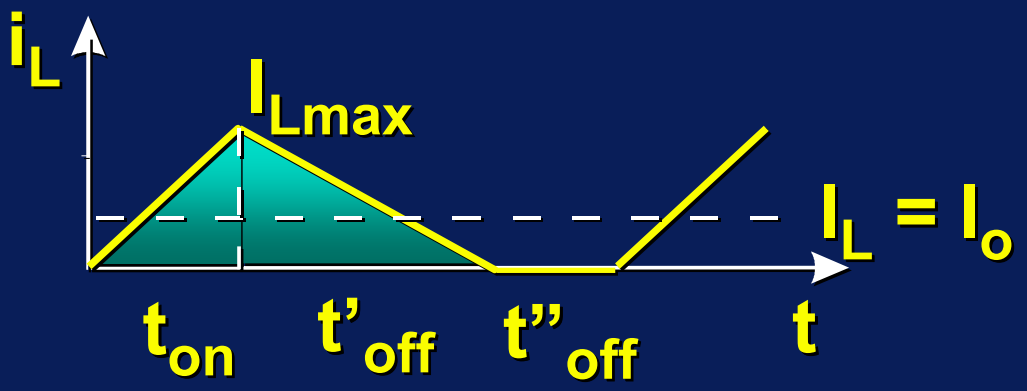


Equazioni risolutive



a) $(U_i - U_o)t_{on} = U_o\, t'_{off}$

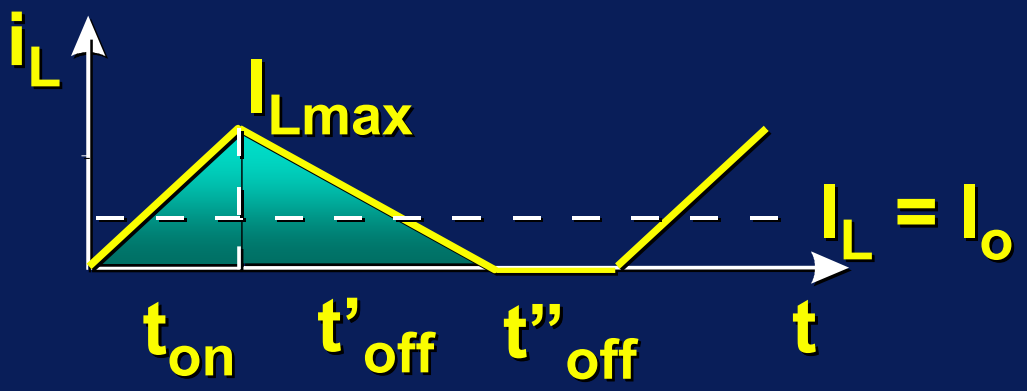
Equazioni risolutive



a) $(U_i - U_o)t_{on} = U_o\, t'_{off}$

b) $I_{L\,max} = \dfrac{U_i - U_o}{L} t_{on}$

Equazioni risolutive

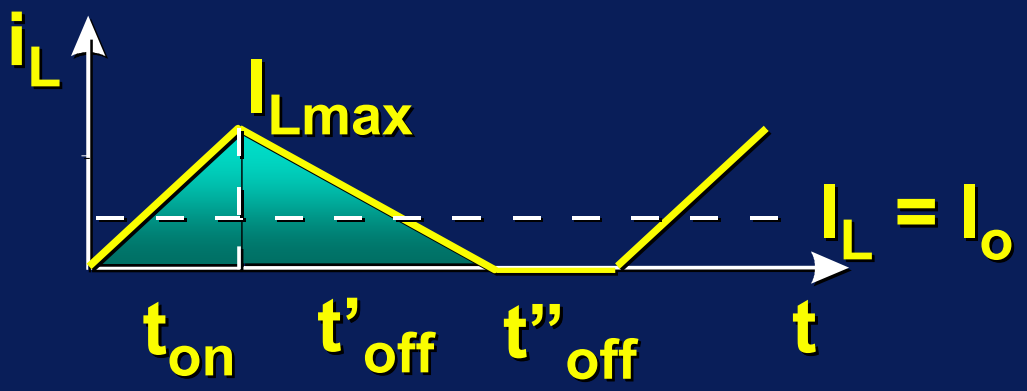


a) $(U_i - U_o)t_{on} = U_o\, t'_{off}$

b) $I_{L\,max} = \dfrac{U_i - U_o}{L} t_{on}$

c) $I_o = I_L = I_{L\,max} \dfrac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$

Equazioni risolutive

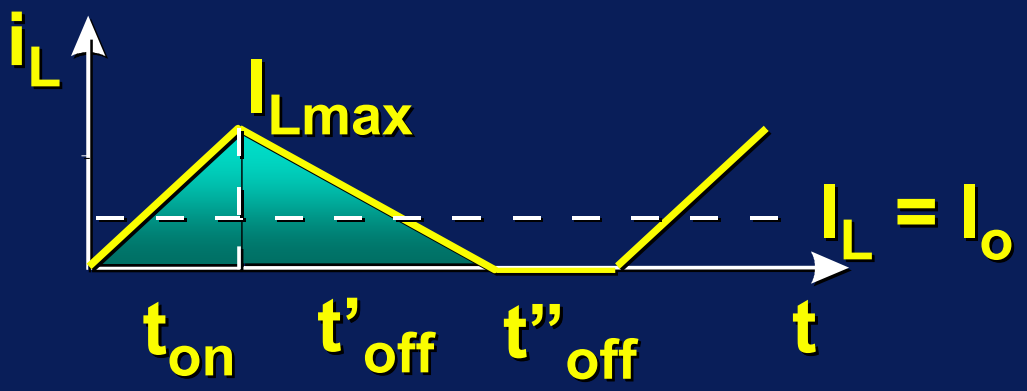


a) $(U_i - U_o)t_{on} = U_o\, t'_{off}$

b) $I_{L\,max} = \dfrac{U_i - U_o}{L} t_{on}$ $\Rightarrow$ $\dfrac{U_o}{U_i} = \dfrac{\delta^2}{\delta^2 + \dfrac{2f_S L I_o}{U_i}}$

c) $I_o = I_L = I_{L\,max} \dfrac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$

Equazioni risolutive



Nota 1:
La caratteristica di controllo è non-lineare e dipende dalla corrente d'uscita I_o

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

Nota 2:

$$I_o = I_L = I_{L\,max}\,\frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$$

Nota 2:

$$I_o = I_L = I_{L\,max}\,\frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$$

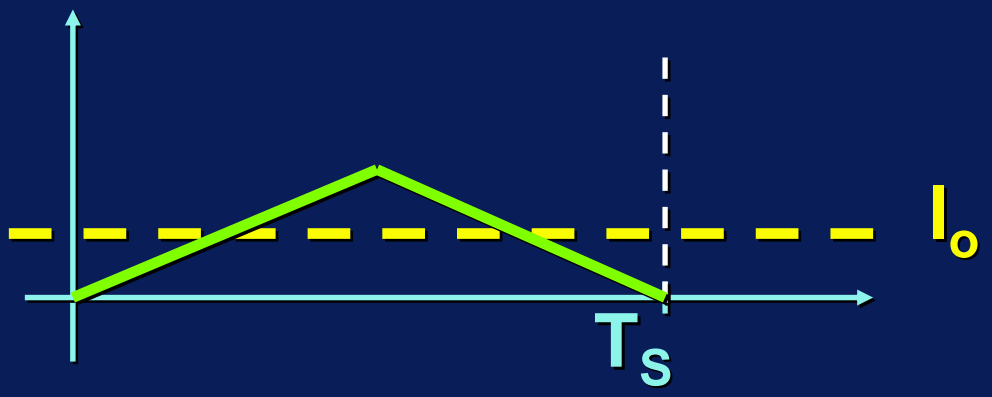
$$I_{L\,max} = 2 \cdot I_o \cdot \frac{T_S}{t_{on} + t'_{off}}$$

Nota 2:

$$I_o = I_L = I_{L\,max}\,\frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$$

$$I_{L\,max} = 2 \cdot I_o \cdot \frac{T_S}{t_{on} + t'_{off}}$$

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

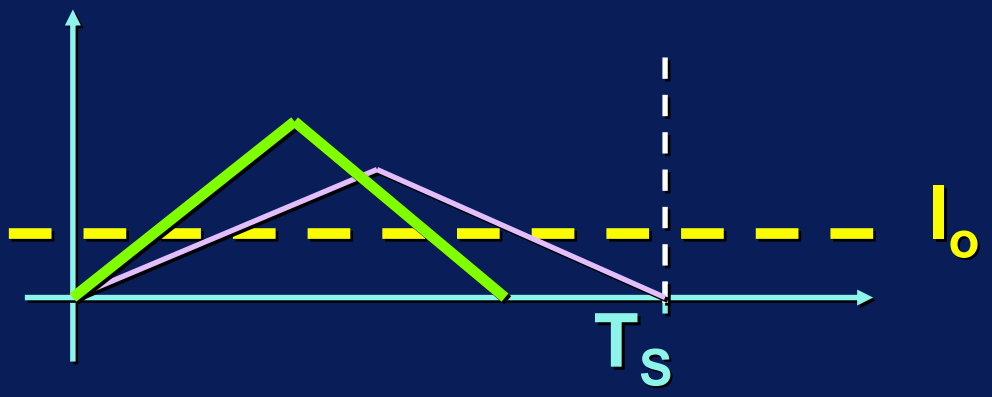


Nota 2:

$$I_o = I_L = I_{L\,max}\,\frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$$

$$I_{L\,max} = 2 \cdot I_o \cdot \frac{T_S}{t_{on} + t'_{off}}$$

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

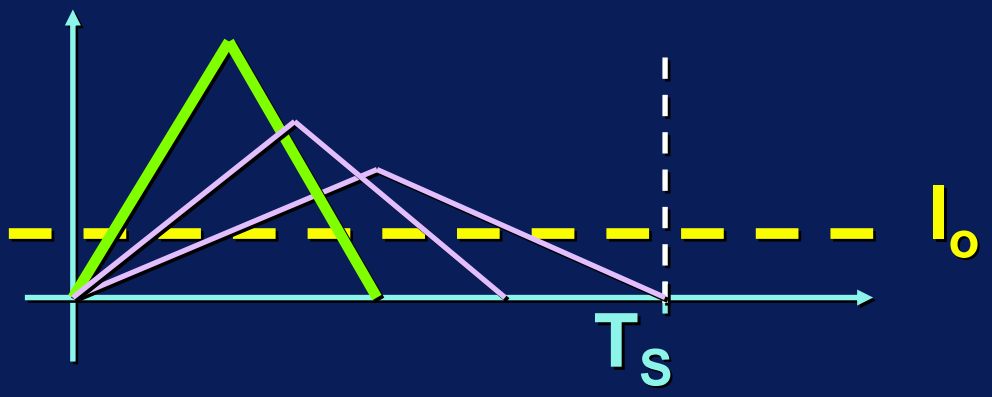


Nota 2:

$$I_o = I_L = I_{L\,max}\,\frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$$

$$I_{L\,max} = 2 \cdot I_o \cdot \frac{T_S}{t_{on} + t'_{off}}$$

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



Nota 2:

$$I_o = I_L = I_{L\,max}\,\frac{t_{on} + t'_{off}}{2 \cdot T_S}$$

$$I_{L\,max} = 2 \cdot I_o \cdot \frac{T_S}{t_{on} + t'_{off}}$$

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

NOTA 3:

A vuoto (I_o =0) il convertitore non è controllabile

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

NOTA 3:

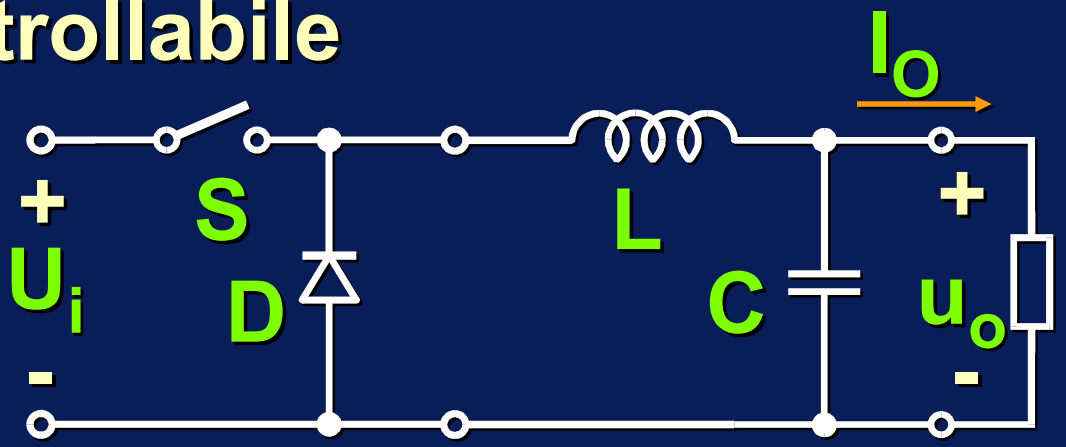
A vuoto (I_o =0) il convertitore non è controllabile

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

Se $I_o \longrightarrow 0$ allora $U_o \longrightarrow U_i$ 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.

Rapporto di conversione $M = \frac{U_o}{U_i}$

Rapporto di conversione $M = \frac{U_o}{U_i}$

CCM

$(I_o > I_{olim})$

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

Rapporto di conversione

$$M = \frac{U_o}{U_i}$$

CCM

$(I_o > I_{olim})$

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

DCM

$(I_o < I_{olim})$

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

Rapporto di conversione

$$M = \frac{U_o}{U_i}$$

CCM

$(I_o > I_{olim})$

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

DCM

$(I_o < I_{olim})$

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_S L} = 2 \Delta I_{L\,max_{CCM}} = 4 I_{o\,lim_{max}}$$

NOTA 1: Se il rendimento è unitario:

$$P_o = P_i \quad \Rightarrow \quad U_i\, I_i = U_o\, I_o$$

NOTA 1: Se il rendimento è unitario:

$$P_o = P_i \quad \Rightarrow \quad U_i\, I_i = U_o\, I_o$$

$$\frac{U_o}{U_i} = M = \frac{I_i}{I_o}$$

N.B. Queste equazioni si riferiscono alle sole componenti continue di i_i e i_o

NOTA 2:

Il rapporto di conversione M (a parità di duty-cycle) è maggiore in funzionamento discontinuo (DCM) che in funzionamento continuo (CCM)

NOTA 2:

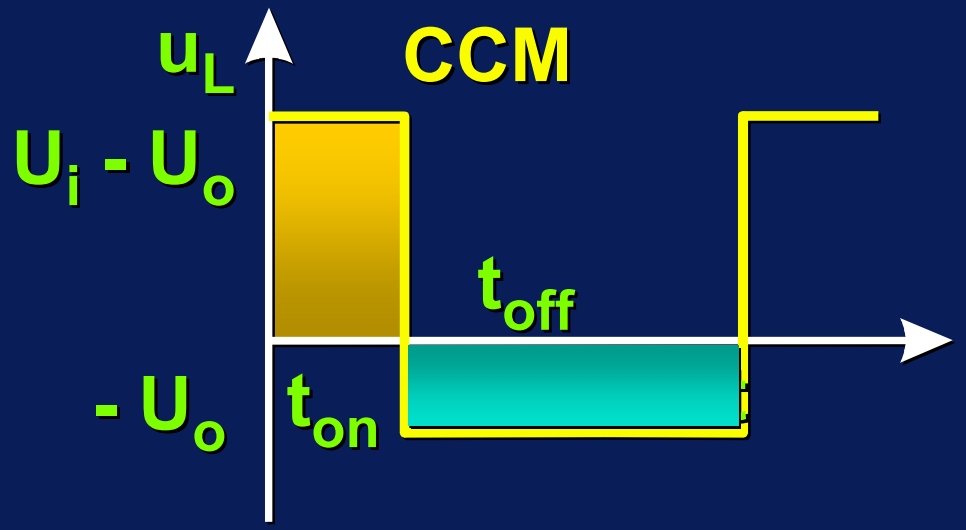
Il rapporto di conversione M (a parità di duty-cycle) è maggiore in funzionamento discontinuo (DCM) che in funzionamento continuo (CCM)

$$M_{DCM} > M_{CCM}$$

$$U_{oDCM} > U_{oCCM}$$

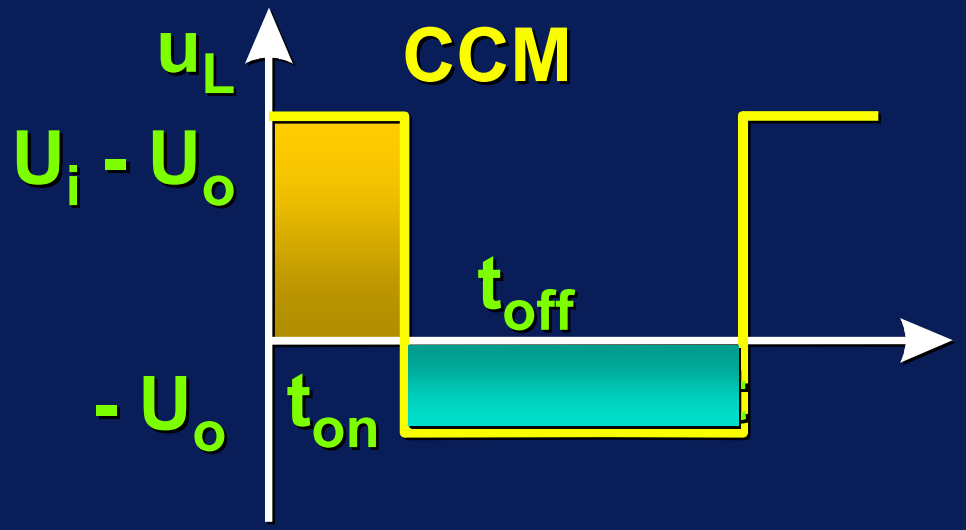
Dimostrazione: $U_{oDCM} > U_{oCCM}$

Dimostrazione: $U_{oDCM} > U_{oCCM}$



$$(U_i - U_{oCCM})\, t_{on} = U_{oCCM}\, t_{off}$$

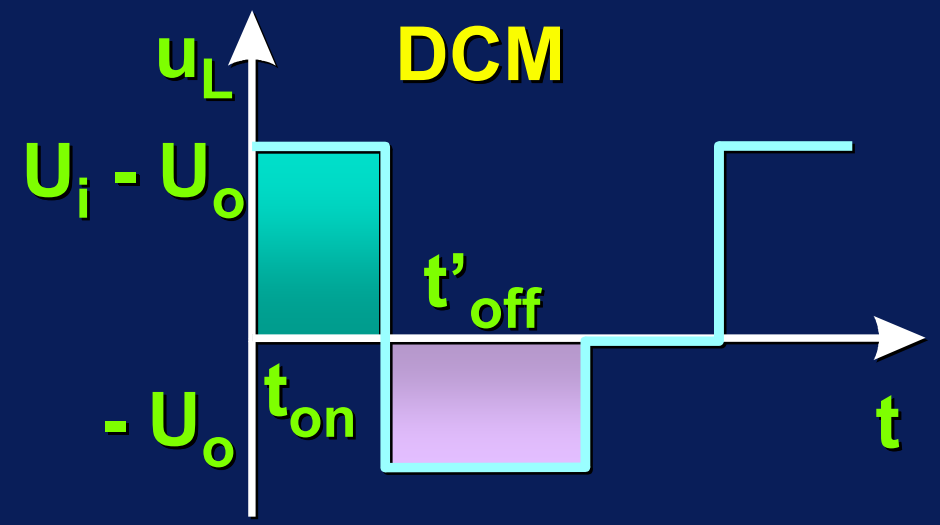
Dimostrazione: $U_{oDCM} > U_{oCCM}$



$$(U_i - U_{oCCM})\, t_{on} = U_{oCCM}\, t_{off}$$

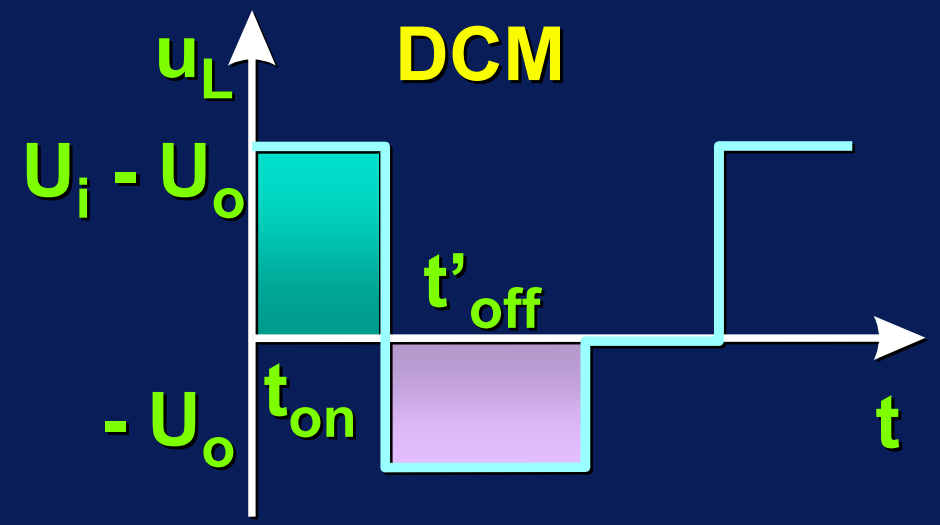
$$U_i\, t_{on} = U_{oCCM}\, T_s$$

Dimostrazione: $U_{oDCM} > U_{oCCM}$



$$(U_i - U_{oDCM})\, t_{on} = U_{oDCM}\, t'_{off}$$

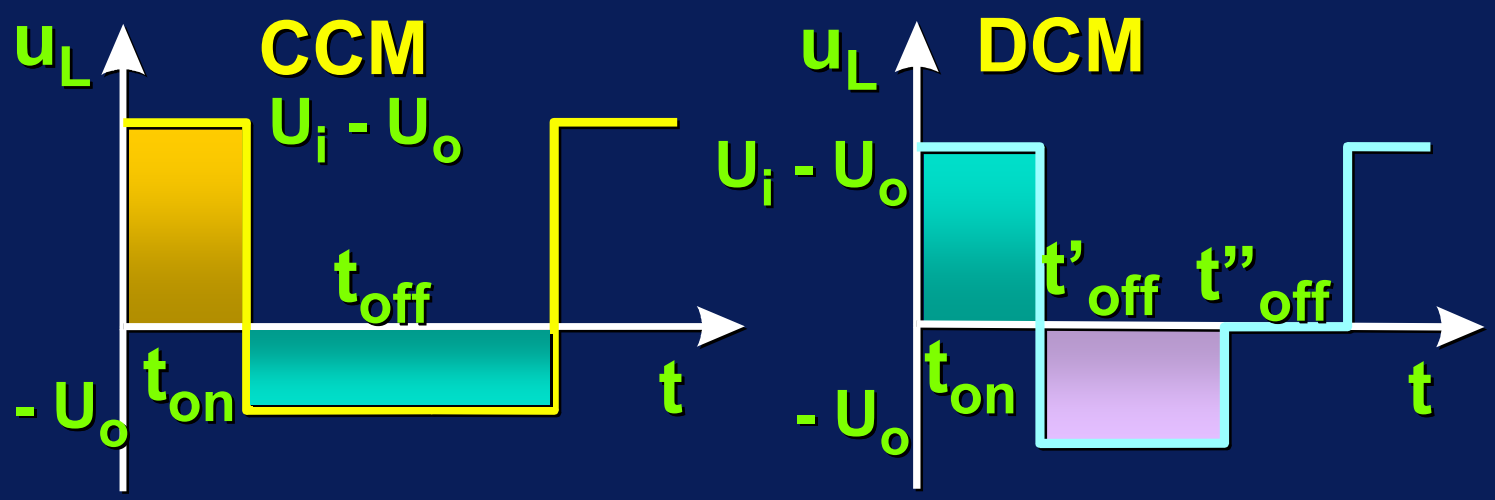
Dimostrazione: $U_{oDCM} > U_{oCCM}$



$$(U_i - U_{oDCM})\, t_{on} = U_{oDCM}\, t'_{off}$$

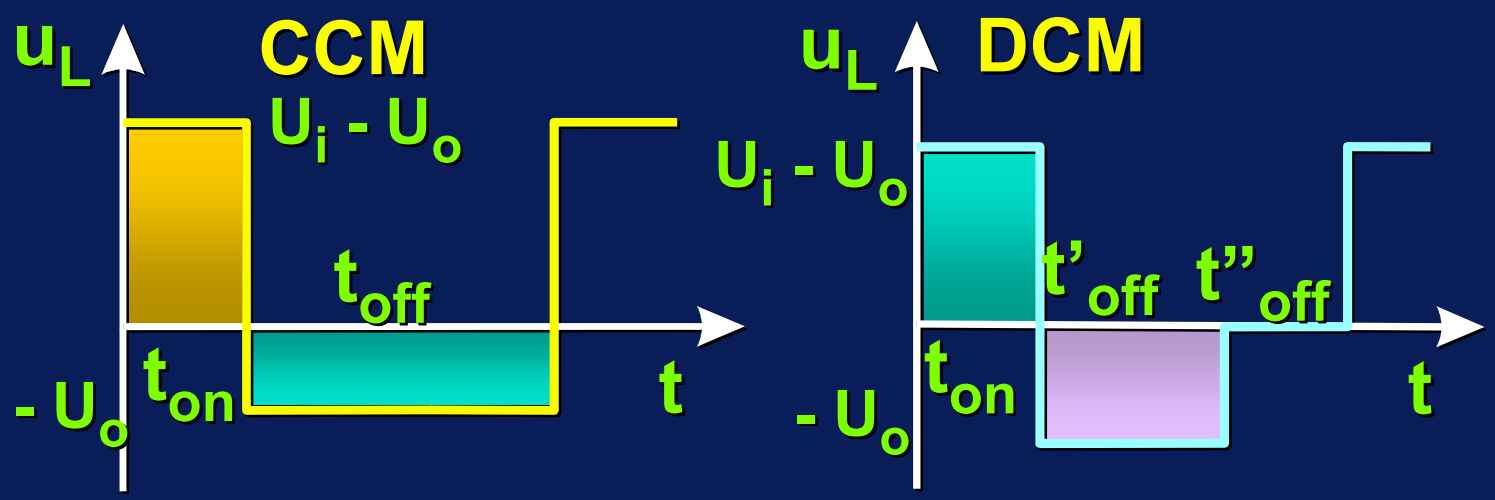
$$U_i\, t_{on} = U_{oDCM}\, (t_{on} + t'_{off})$$

Dimostrazione: $U_{oDCM} > U_{oCCM}$



$U_i\, t_{on} = U_{oCCM}\, T_S$ $\quad$ $U_i\, t_{on} = U_{oDCM}\, (t_{on} + t'_{off})$

Dimostrazione: $U_{oDCM} > U_{oCCM}$

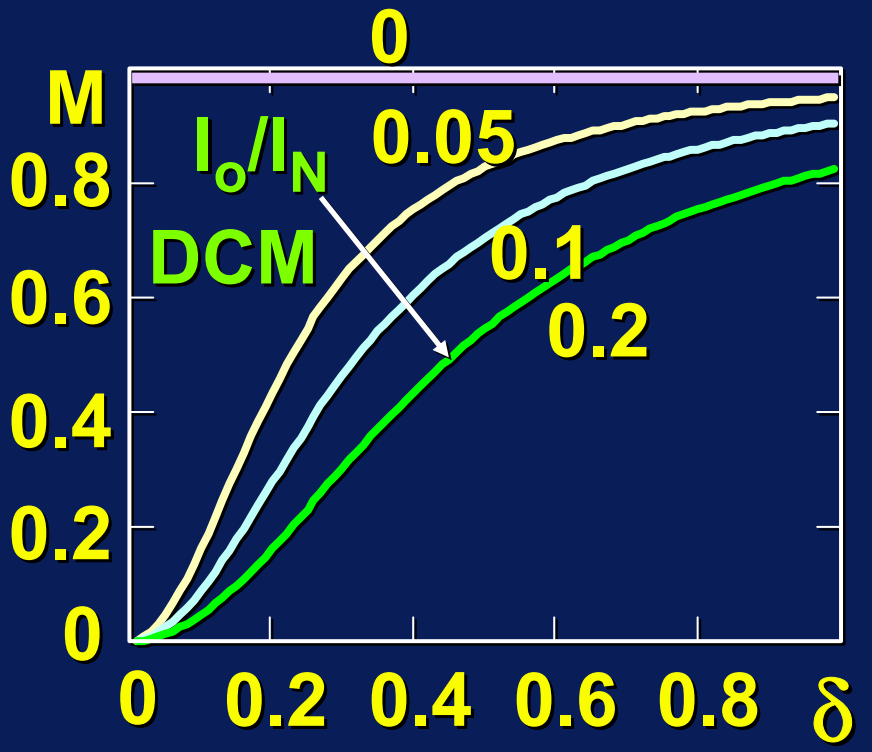


$U_i\, t_{on} = U_{oCCM}\, T_S$ $\quad$ $U_i\, t_{on} = U_{oDCM}\, (t_{on} + t'_{off})$

$$\frac{U_{oDCM}}{U_{oCCM}} = \frac{T_S}{T_S - t''_{off}} > 1$$

Caratteristiche di controllo M = f(δ)

Caratteristiche di controllo M = f(δ)



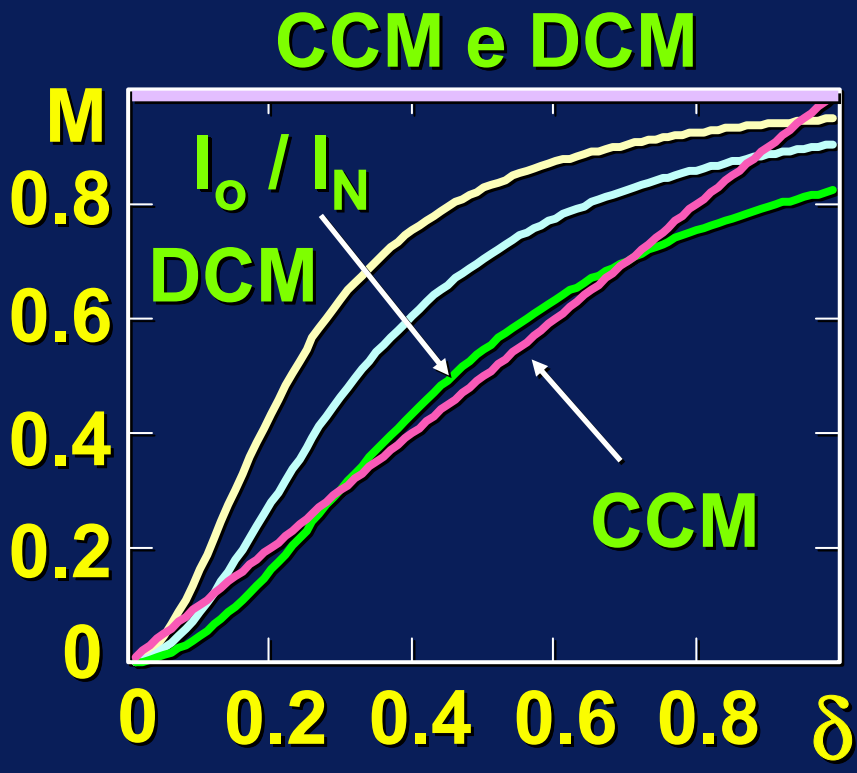
(Curve ad I_o costante)

DCM:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_S L}$$

Caratteristiche di controllo M = f(δ)



DCM:

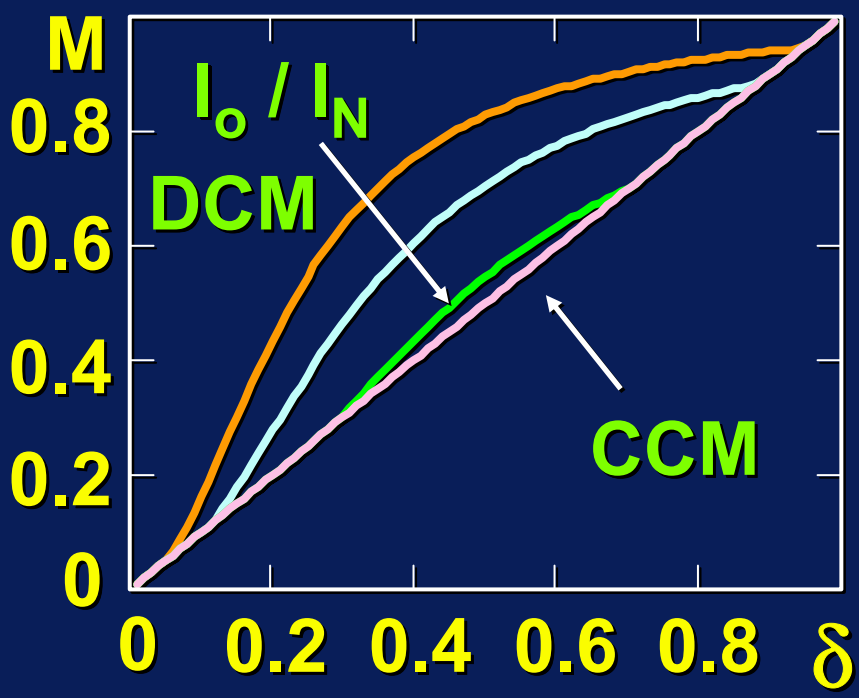
$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_S L}$$

CCM: $M = \delta$

Valgono le curve corrispondenti a U_o più elevata

Caratteristiche di controllo M = f(δ)



Curve complessive

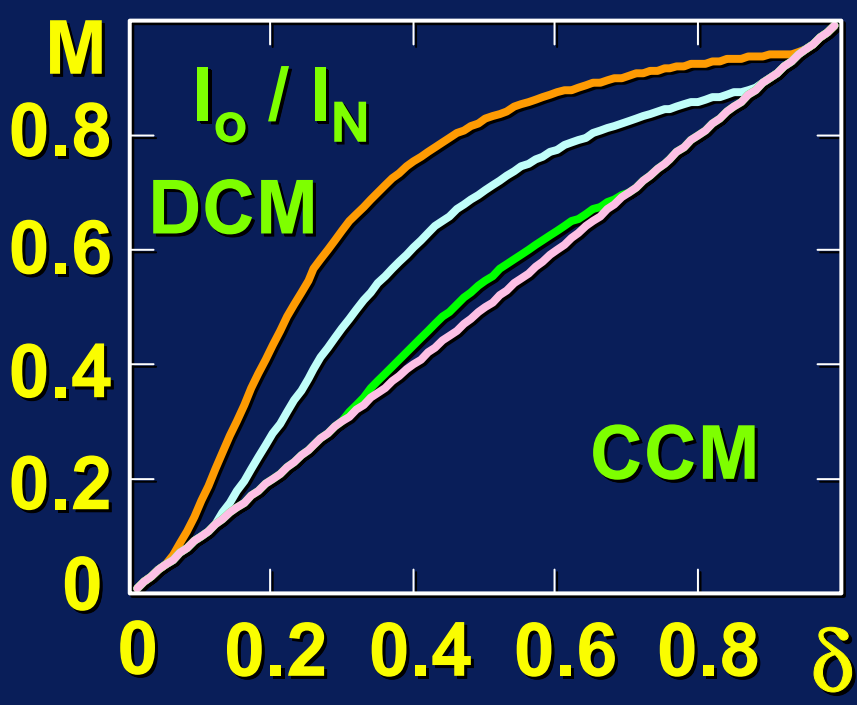
DCM:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_S L}$$

CCM: $M = \delta$

Caratteristiche di controllo M = f(δ)



DCM:

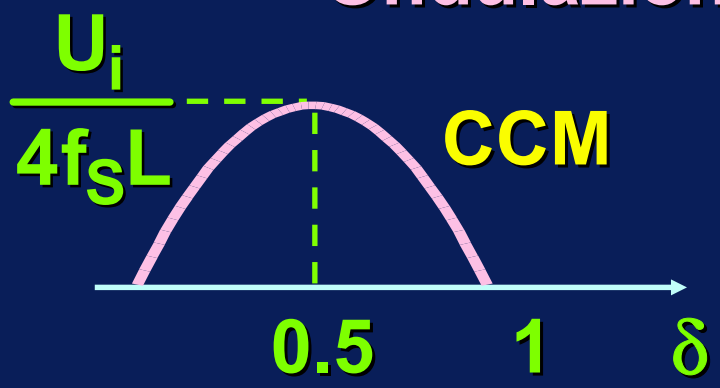
$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_S L}$$

CCM: $M = \delta$

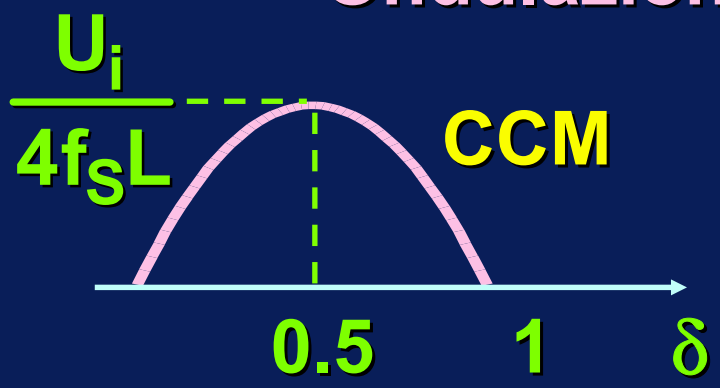
NOTA: a parità di I_o il funzionamento è continuo per valori bassi o elevati di δ (ove ΔI_L è minore)

Ondulazione di corrente

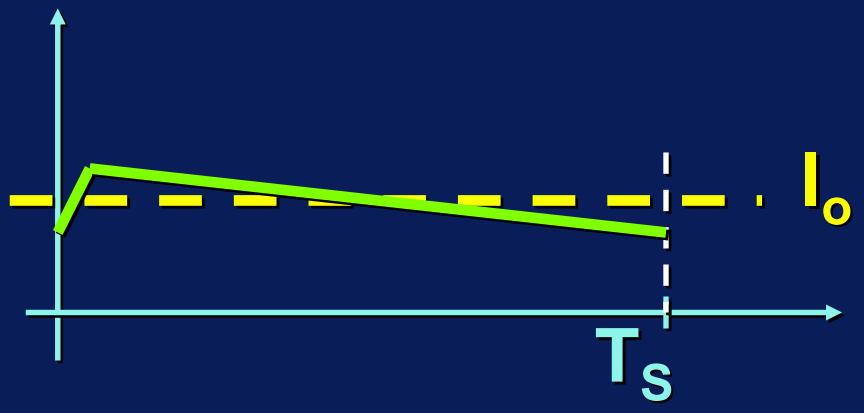


$$\Delta I_L = \frac{U_i \cdot \delta \cdot (1 - \delta)}{f_S \cdot L}$$

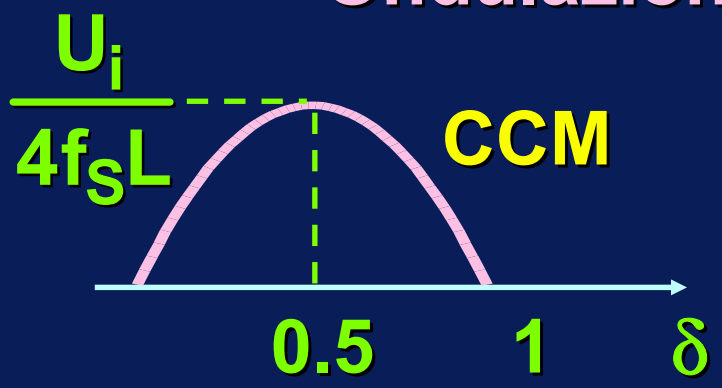
Ondulazione di corrente



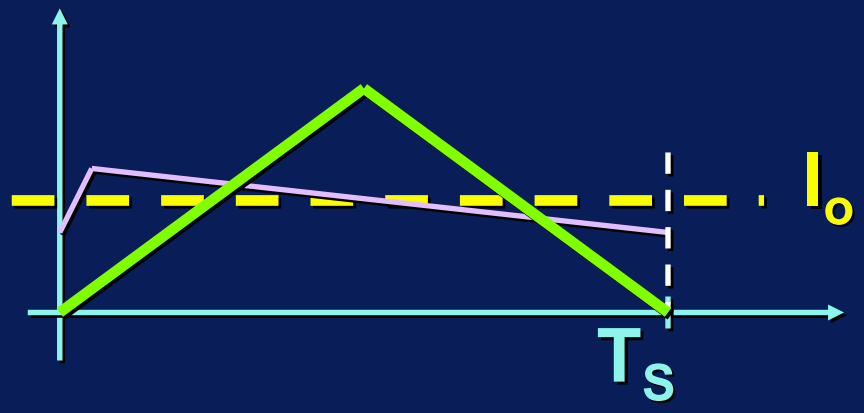
$$\Delta I_L = \frac{U_i \cdot \delta \cdot (1 - \delta)}{f_S \cdot L}$$



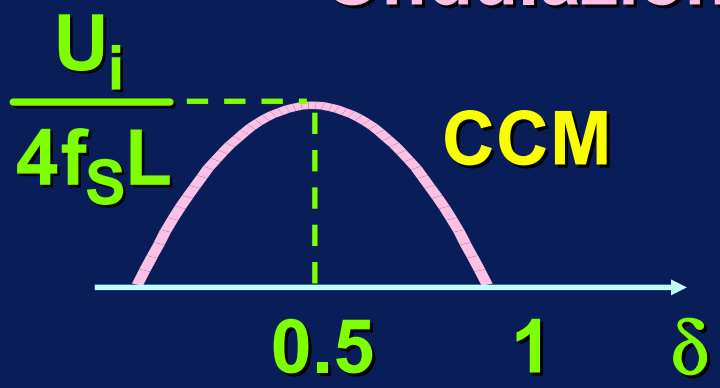
Ondulazione di corrente



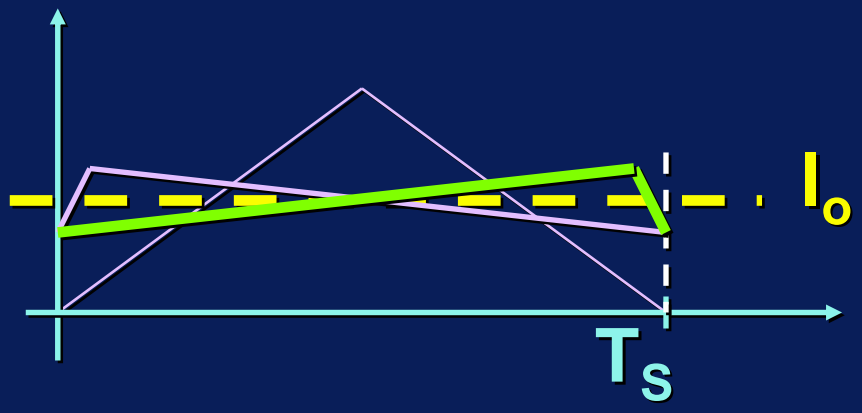
$$\Delta I_L = \frac{U_i \cdot \delta \cdot (1-\delta)}{f_S \cdot L}$$



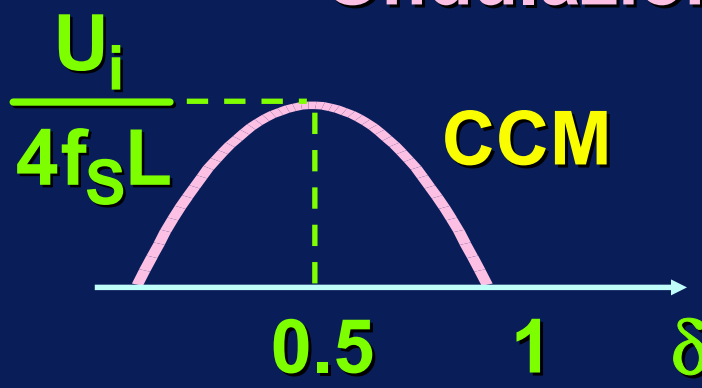
Ondulazione di corrente



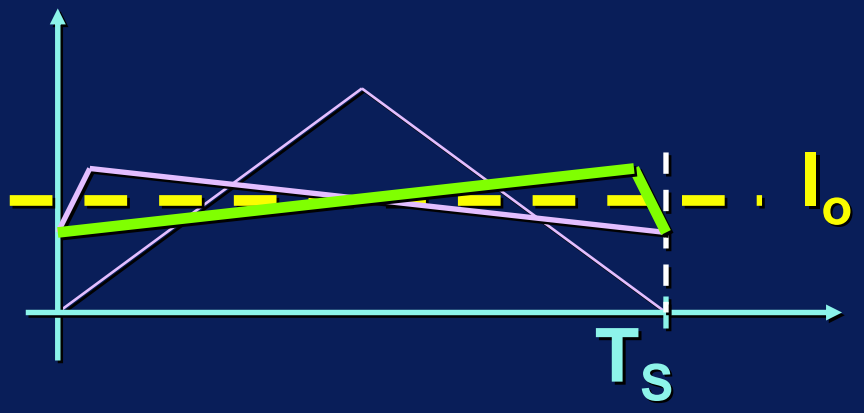
$$\Delta I_L = \frac{U_i \cdot \delta \cdot (1-\delta)}{f_S \cdot L}$$



Ondulazione di corrente

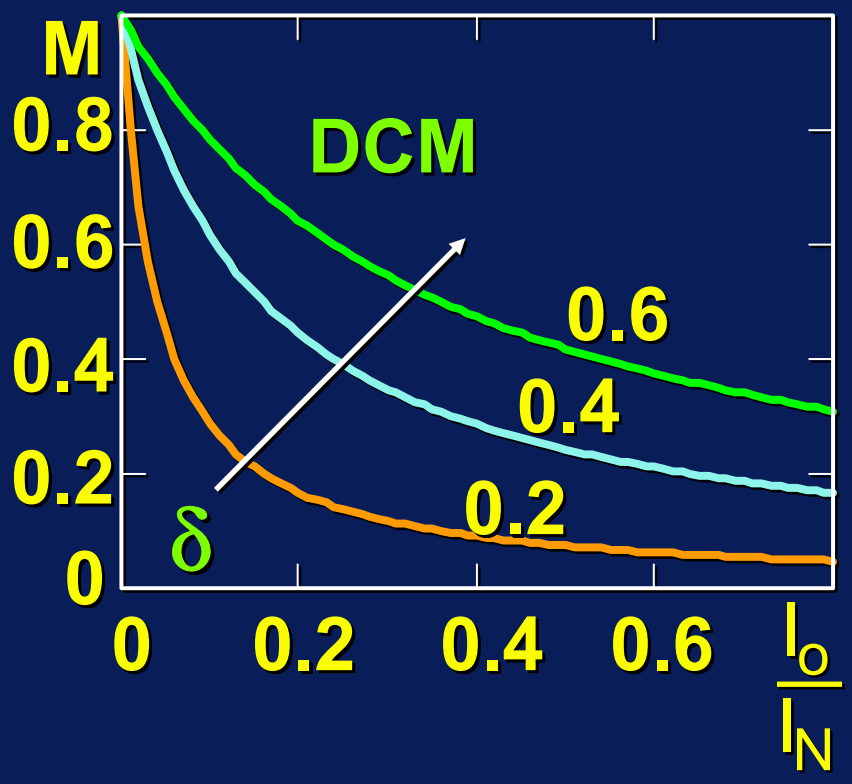


$$\Delta I_L = \frac{U_i \cdot \delta \cdot (1-\delta)}{f_S \cdot L}$$



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 $M = f(I_o/I_N)$

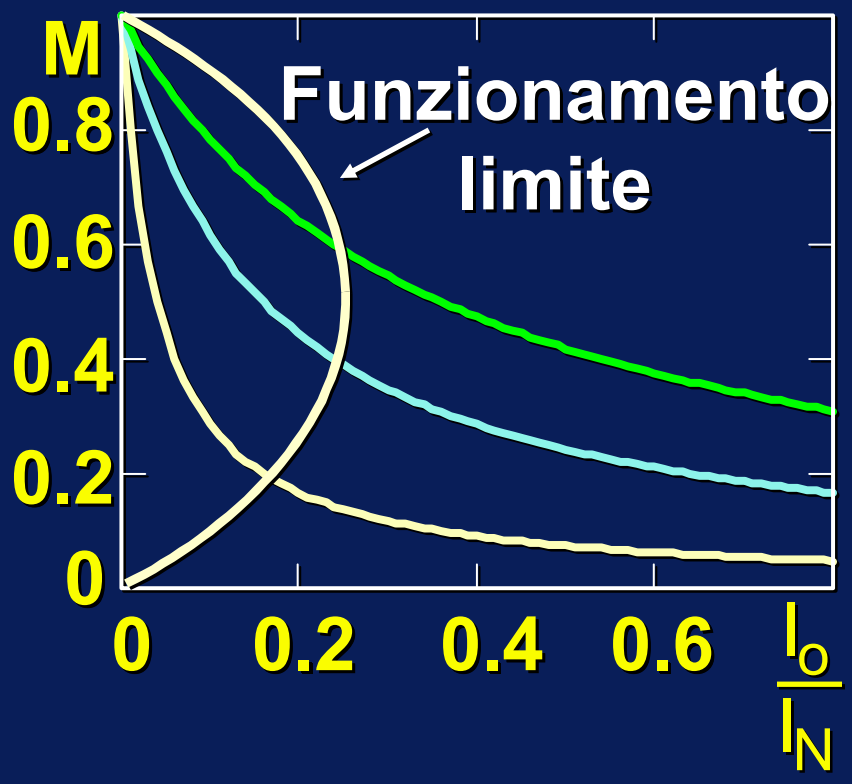


DCM:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_S L}$$

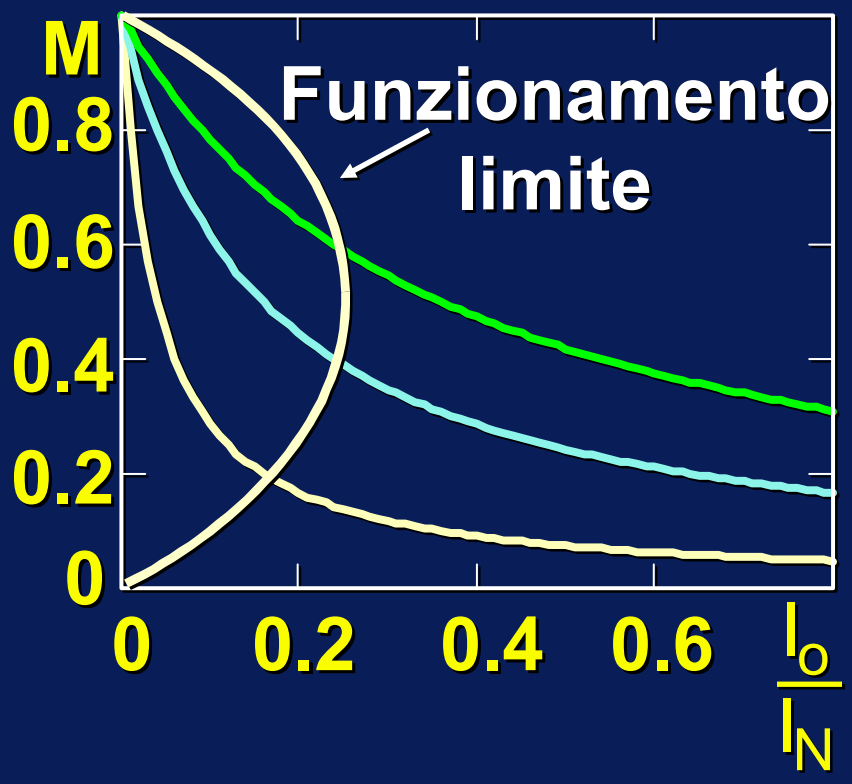
Caratteristiche di uscita $M = f(I_o/I_N)$



Funzionamento limite:

$$M_{CCM} = M_{DCM}$$

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

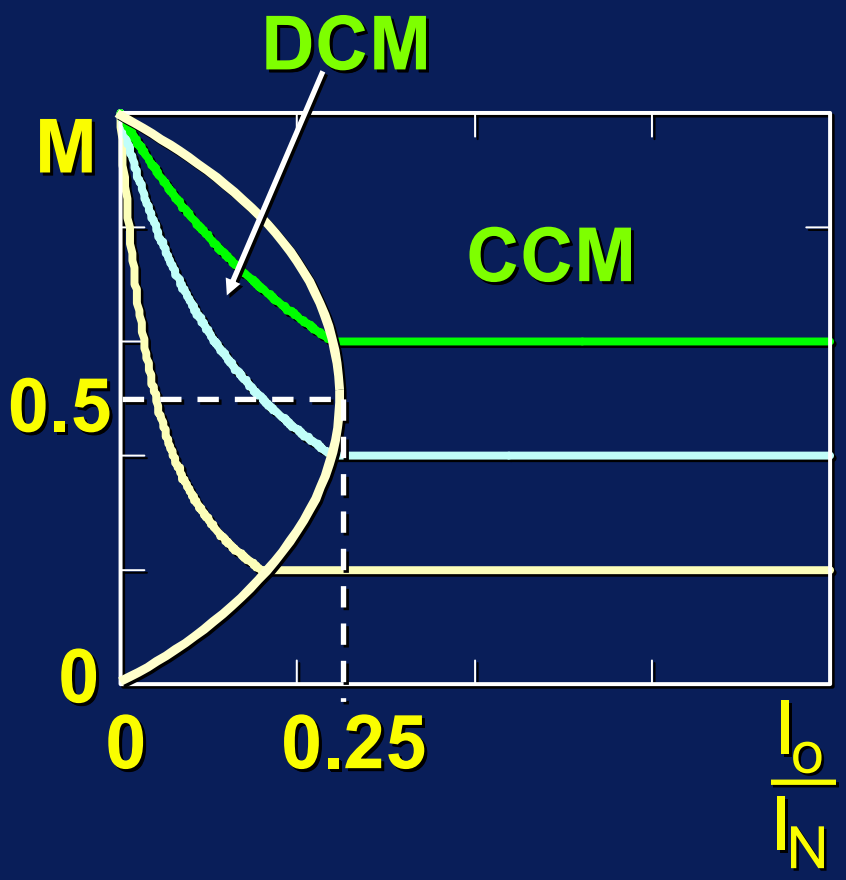


Funzionamento limite:

$$M_{CCM} = M_{DCM}$$

$$\frac{I_o}{I_N} = M - M^2$$

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



Curve complessive

DCM:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{I_o}{I_N}}$$

$$I_N = \frac{U_i}{2 f_S L}$$

CCM: $M = \delta$

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

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

CCM → $M = \frac{U_o}{U_i} = \delta$

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

CCM ➡ $M = \frac{U_o}{U_i} = \delta$

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

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

CCM → $M = \frac{U_o}{U_i} = \delta$

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

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

Funzionamento con carico resistivo

Caso limite tra CCM e DCM

Funzionamento con carico resistivo

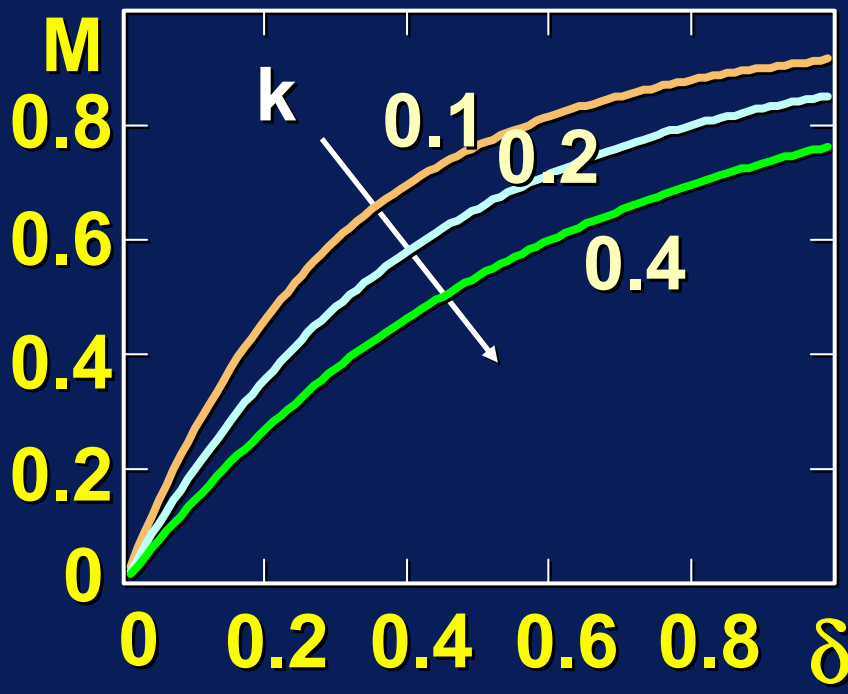
Caso limite tra CCM e DCM

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

- 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(δ)



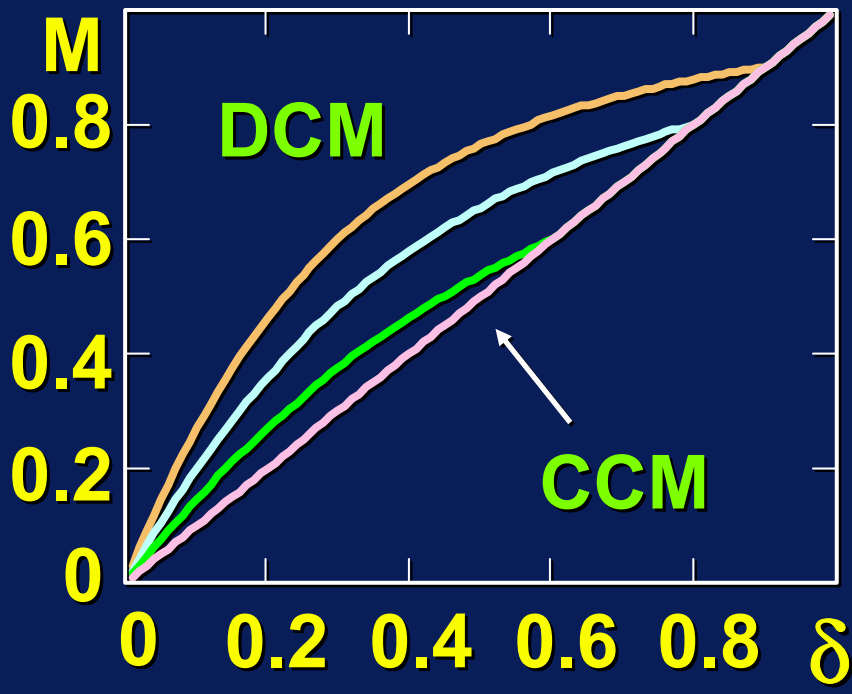
DCM:

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

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

Carico resistivo

Caratteristiche di controllo M = f(δ)



Curve complessive

DCM:

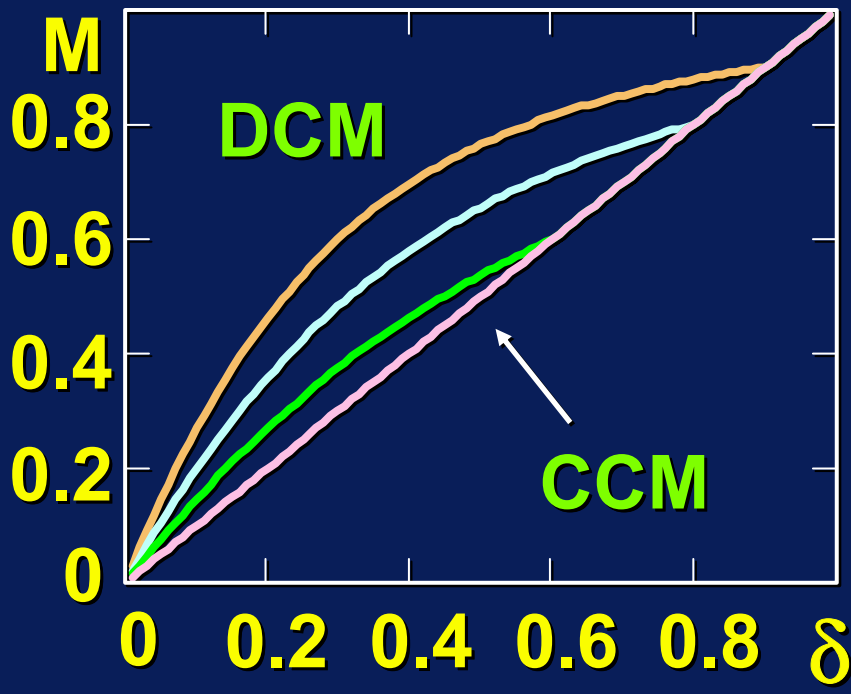
$$M = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4k}{\delta^2}}}$$

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

CCM: $M = \delta$

Carico resistivo

Caratteristiche di controllo M = f(δ)



DCM:

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

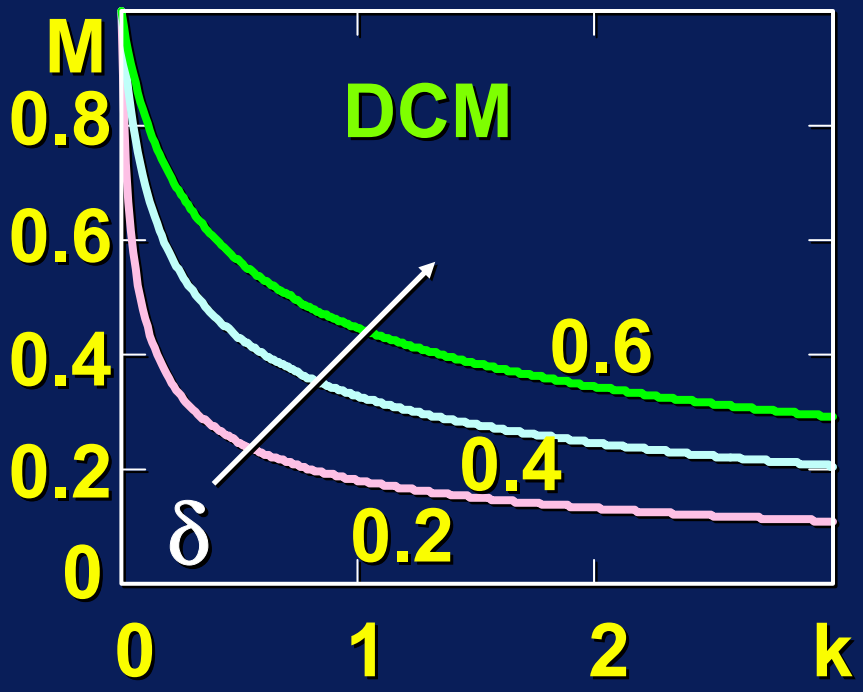
$$k = \frac{2 f_S L}{R_o}$$

CCM: $M = \delta$

Il funzionamento è discontinuo per $U_o < U_i (1-k)$

Carico resistivo

Caratteristiche di uscita M = f(k)

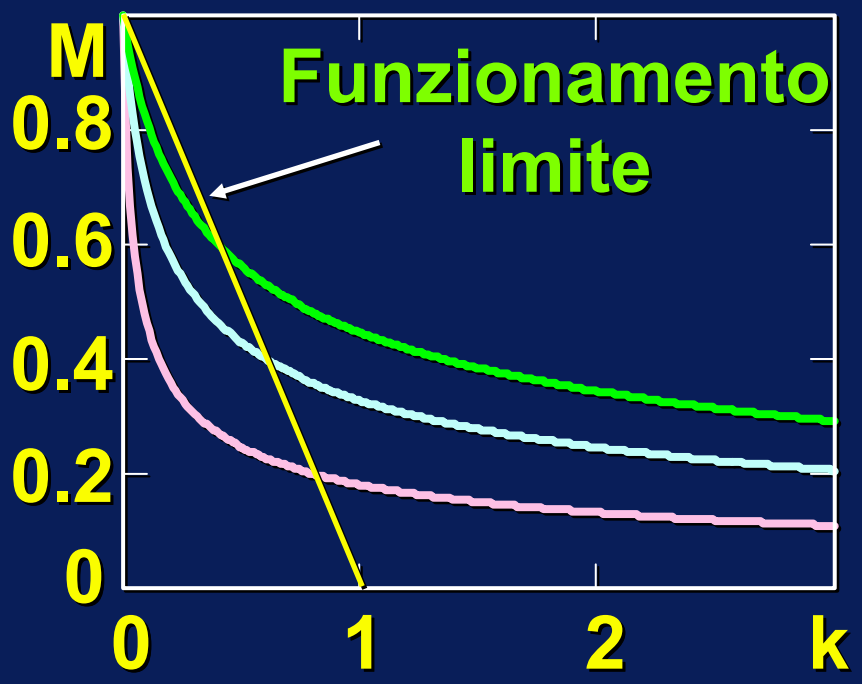


$$M = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4k}{\delta^2}}}$$

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

Carico resistivo

Caratteristiche di uscita M = f(k)



DCM:

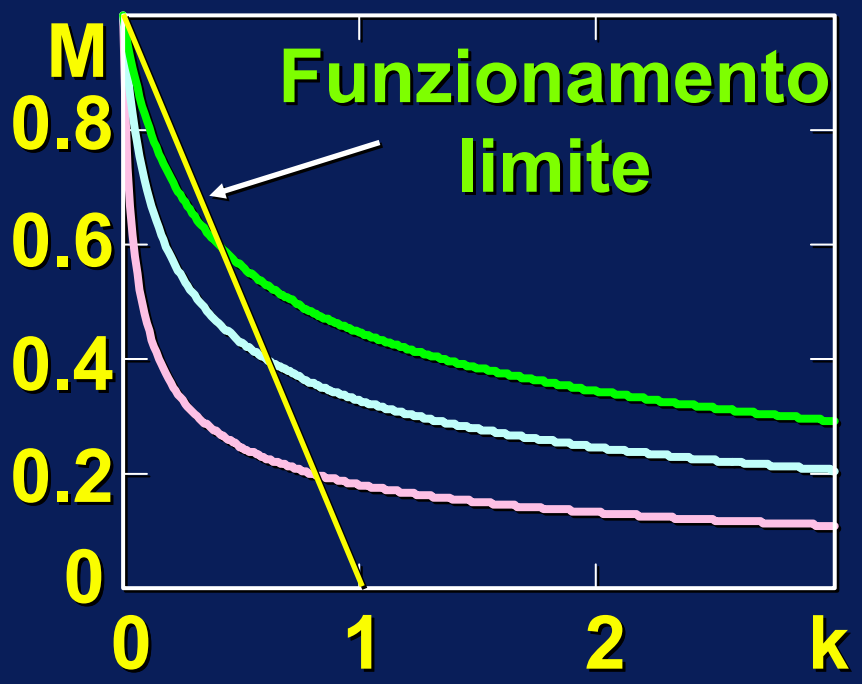
$$M = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4k}{\delta^2}}}$$

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

CCM: $M = \delta$

Carico resistivo

Caratteristiche di uscita M = f(k)



Funzionamento limite:

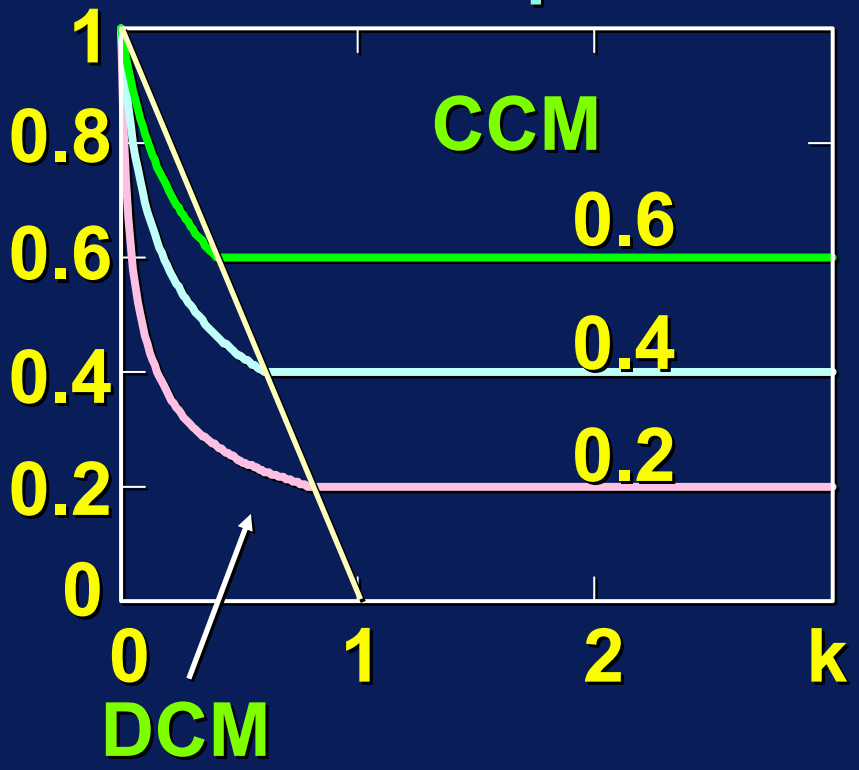
$M_{CCM} = M_{DCM}$

$M = 1-k$

Carico resistivo

Caratteristiche di uscita M = f(k)

Curve complessive



DCM:

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

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

CCM: $M = \delta$

Laboratorio

Analisi delle forme d'onda di un convertitore buck (CCM e DCM)

Funzionamento a regime

Conclusioni

- La caratteristica di controllo del convertitore buck risulta lineare solo in CCM
- In DCM la caratteristica di controllo è nonlineare e dipendente 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