

# POWER QUALITY E SISTEMI ATTIVI DI COMPENSAZIONE

**Prof. Simone CASTELLAN**

- [1] *IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*, IEEE Standard 519 – 1992.
- [2] H.Akagi, E.H.Watanabe and M.Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*, IEEE Press, 2007.
- [3] M.H.Rashid, *Power electronics handbook*, Academic Press, 2001.
- [4] G.Buja and S.Castellan, *A flicker compensation strategy*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.24, No.5, pp.1243-1247, May 2009.

# INTRODUZIONE

Degrado della qualità dell'energia elettrica fornita dalle reti di distribuzione a causa della presenza di carichi inquinanti che assorbono singolarmente o globalmente una potenza elevata.

## CARICHI INQUINANTI

Carichi non lineari

Carichi ohmico-induttivi  
tempo varianti

## EFFETTI INDESIDERATI

Armoniche di  
corrente

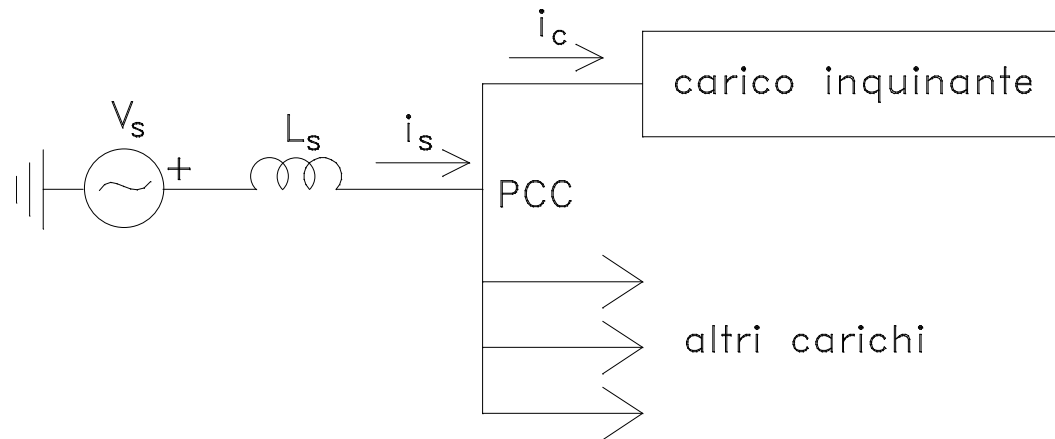
Fluttuazione della  
tensione nel PCC

## SISTEMI TRADIZIONALI DI COMPENSAZIONE

Filtri passivi

Reattori controllati  
con tiristori (TCR)

# SCHEMA DEL SISTEMA ELETTRICO



Se la rete è “debole”, cioè se l’impedenza di rete non è piccola rispetto a quella del carico inquinante, la corrente assorbita dal carico inquinante provoca una caduta di tensione su  $L_s$  che perturba la tensione nel punto di allacciamento comune (PCC).

# RAPPORTO DI CORTO CIRCUITO

Si definisce rapporto di cortocircuito  $SCR$  (Short Circuit Ratio) nel PCC il rapporto fra la potenza  $S_{cc}$  di cortocircuito della rete di alimentazione e la massima potenza attiva  $P_C$  assorbita dal carico

$$SCR = \frac{S_{cc}}{P_C} = \frac{I_{cc}}{I_1}$$

$I_{cc}$  = corrente di cortocircuito della rete di alimentazione

$I_1$  = corrente massima assorbita dal carico

$$V_{PCC_h} = h\omega L_s I_h$$

$$V_{PCC_h} \% = \frac{V_{PCC_h}}{V_s} \times 100$$

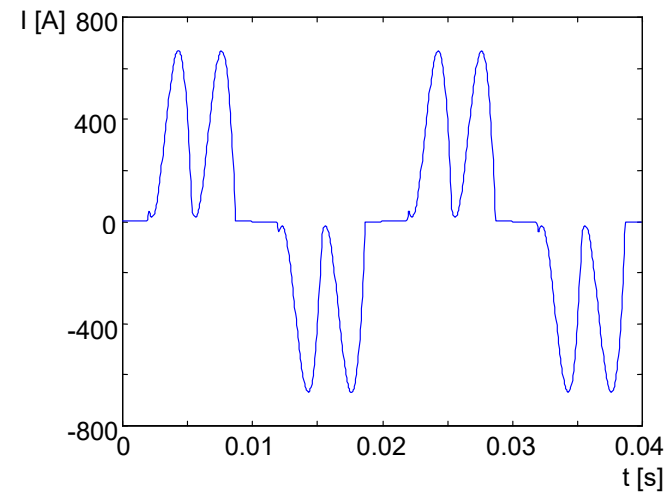
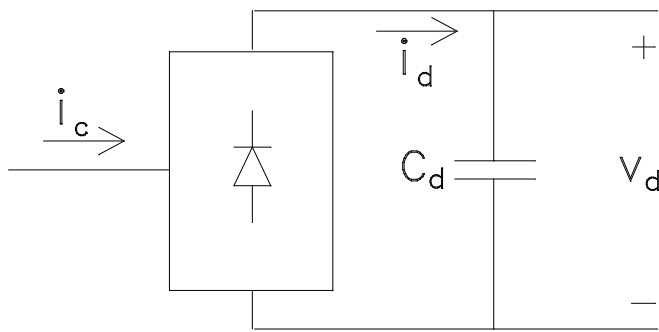
$$I_{cc} = \frac{V_s}{\omega L_s} \rightarrow V_s = \omega L_s I_{cc}$$

$$V_{PCC_h} \% = h \frac{I_h}{I_{cc}} \times 100 = h \frac{I_h/I_1}{I_{cc}/I_1} \times 100 = h \frac{I_h/I_1}{SCR} \times 100$$

L'ampiezza dell'armonica di tensione di ordine  $h$  nel PCC è tanto più piccola quanto più grande è  $SCR$ .

# CARICHI NON LINEARI

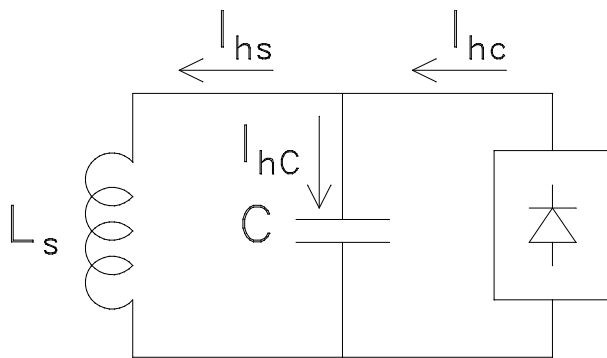
I carichi non lineari più diffusi sono i convertitori statici ca/cc. Essi assorbono armoniche di corrente di ampiezza elevata alle basse frequenze ( $5^{\wedge}$ ,  $7^{\wedge}$ , ...).



*EFFETTI INDESIDERATI*: distorsione della corrente di linea e della tensione del PCC

# CONSEGUENZE DELLA DISTORSIONE DI CORRENTE E DI TENSIONE

- Incremento delle perdite nelle linee, nei trasformatori e negli altri dispositivi collegati
- Accelerazione dei processi di invecchiamento nei sistemi elettrici
- Oscillazioni di coppia e rumore nelle macchine elettriche rotanti
- Possibili interferenze nelle telecomunicazioni ed errori nei sistemi di misura
- Possibili mal funzionamenti nei sistemi di controllo sincronizzati sulla tensione di rete
- Rischio dell'insorgenza di fenomeni di risonanza parallelo nei sistemi dove sono presenti banchi di condensatori



$$f_P = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_s C}} = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{X_C}{X_s}} = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_C}}$$

# STANDARD IEEE SUI LIMITI DELLE ARMONICHE

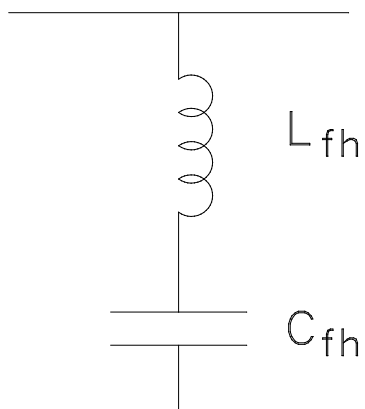
Lo Standard 519 della IEEE riporta indicazioni e valori limite sulla distorsione di tensione alla quale può essere soggetto il PCC e sulle armoniche di corrente che possono essere iniettate in rete dai carichi. Le limitazioni sulla distorsione di tensione devono essere rispettate dal fornitore del servizio elettrico mentre le limitazioni sulle armoniche di corrente devono essere rispettate dagli utenti.

Le singole armoniche di tensione nel PCC non devono superare il 3% della fondamentale mentre la distorsione armonica globale non deve superare il 5%.

$I_{cc}/I_1$	$I_h/I_1$ (%) – ARMONICHE DISPARI					TDD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

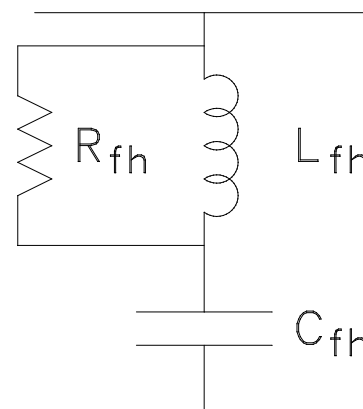
Limiti per le armoniche di corrente in % del valore massimo della fondamentale di corrente per sistemi di distribuzione con tensioni comprese fra 120V e 69KV. I valori limite per le armoniche pari sono uguali al 25% dei valori limite per le armoniche dispari.

# FILTRI PASSIVI



Filtro selettivo

$$\dot{Z} = j \left( \omega L_{fh} - \frac{1}{\omega C_{fh}} \right)$$



Filtro passaalto

$$\dot{Z} = \frac{j\omega L_{fh} R_{fh}}{R_{fh} + j\omega L_{fh}} - j \frac{1}{\omega C_{fh}}$$

$\omega$  bassa

$$\dot{Z} \cong -j \frac{1}{\omega C_{fh}}$$

$\omega$  elevata

$$\dot{Z} \cong R_{fh}$$



# CARATTERISTICHE DEI FILTRI PASSIVI

## POSITIVE:

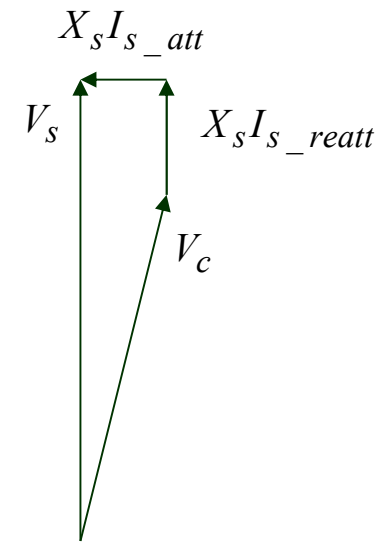
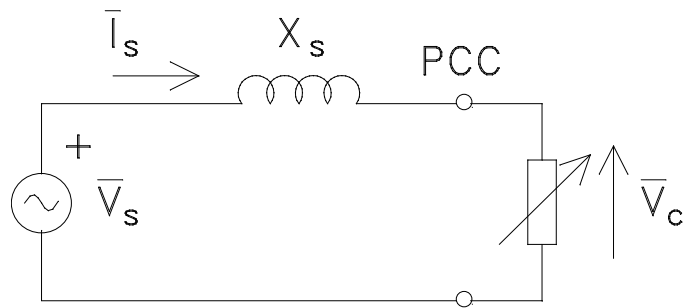
- basso costo
- elevata affidabilità
- semplicità realizzativa

## NEGATIVE:

- deriva con il tempo e la temperatura dei componenti
- interazione con la rete che può dar luogo a fenomeni sia di risonanza parallelo che di sovraccarico
- lentezza dei transitori di assestamento

# CARICHI TEMPO VARIANTI

Analisi semplificata del sistema rete-carico nell'ipotesi di funzionamento quasi-stazionario



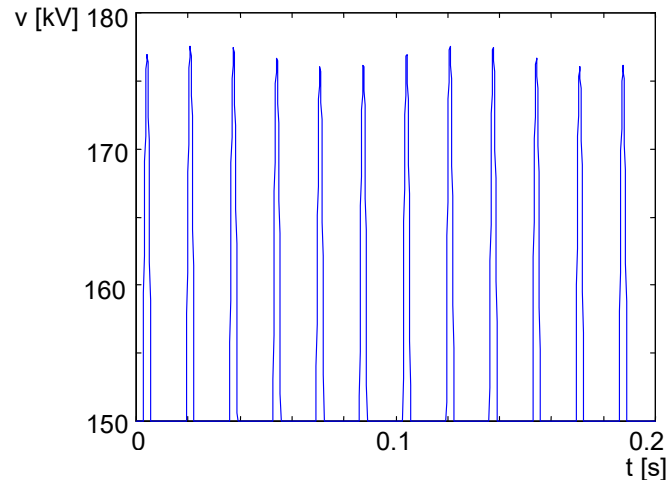
$$\bar{I}_s = I_{s\_att} + jI_{s\_reatt}$$

$$\Delta Q_c \cong V_c \Delta I_{s\_reatt} \quad S_{cc} = \frac{V_s^2}{X_s} \cong \frac{V_c^2}{X_s}$$

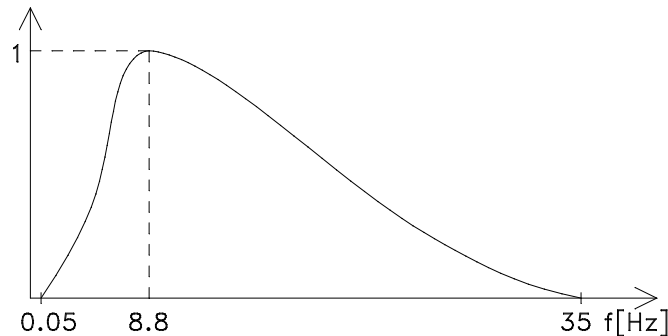
$$\Delta V_c \cong X_s \Delta I_{s\_reatt} \Rightarrow \frac{\Delta V_c}{V_c} = \frac{\Delta Q_c}{S_{cc}}$$

**EFFETTI INDESIDERATI:** fluttuazione della tensione del PCC

# CONSEGUENZE DELLA FLUTTUAZIONE DI TENSIONE

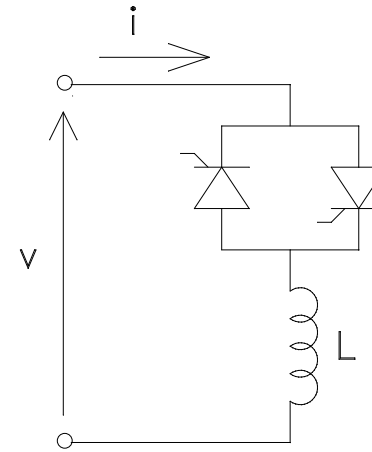
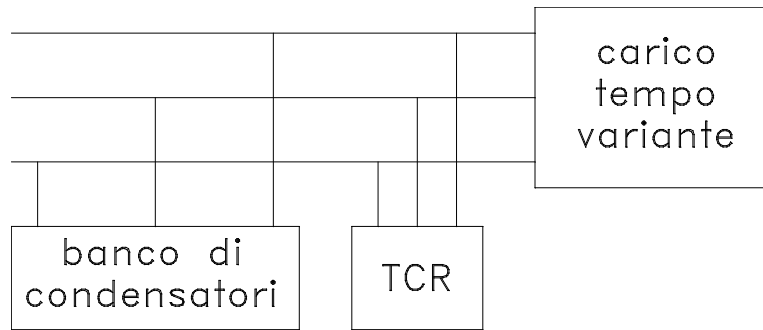


Sfarfallio dell'intensità luminosa delle lampade ad incandescenza connesse alla rete (fenomeno del flicker). Lo sfarfallio percepibile dall'occhio umano è compreso nella banda di frequenza 0.05-35Hz (con il massimo di sensibilità a 8.8Hz) e può arrecare notevole fastidio alle persone.

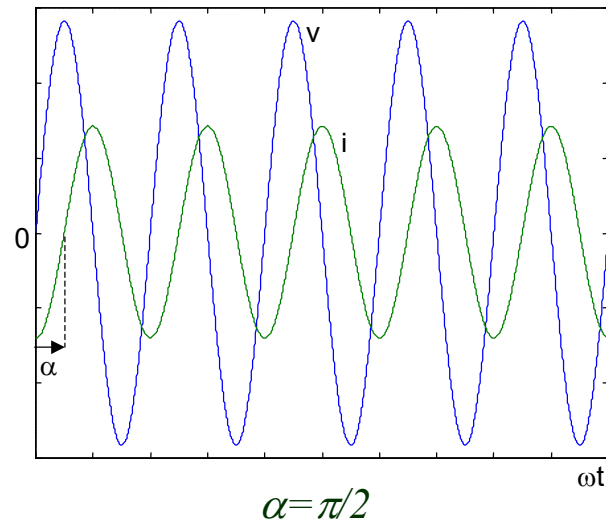


I carichi tempo varianti più inquinanti sono i forni ad arco perché assorbono una potenza molto elevata.

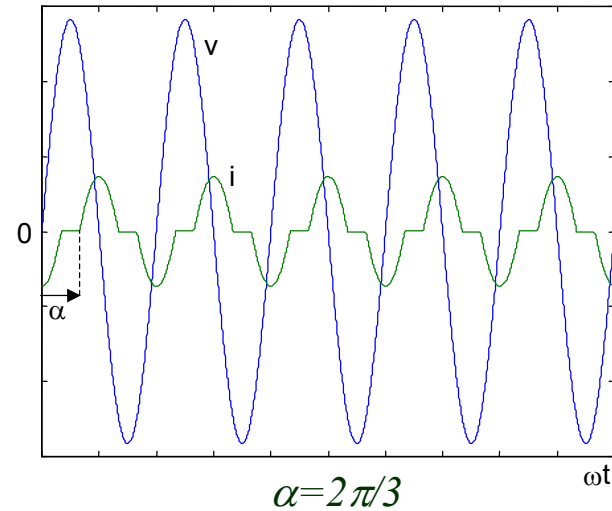
# TCR (Thyristor Controlled Reactor)



$$\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$$



# EQUAZIONI DEL TCR



$$i = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{X_L} \cdot [\cos \alpha - \cos(\omega t)], \quad \alpha < \omega t < 2\pi - \alpha$$

$$i = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{X_L} \cdot [-\cos \alpha - \cos(\omega t)], \quad \pi + \alpha < \omega t < \pi - \alpha$$

$$i = 0, \quad 2\pi - \alpha \leq \omega t \leq \pi + \alpha \quad \pi - \alpha \leq \omega t \leq \alpha$$

$$I_1 = \frac{V}{\pi X_L} (2\pi - 2\alpha + \text{sen } 2\alpha)$$

# SVANTAGGI DEL TCR

- Compensazione di tipo indiretto  $\Rightarrow$  è richiesta l'installazione di banchi di condensatori di potenza superiore alla potenza reattiva mediamente assorbita dal carico.
- Dinamica non sufficientemente veloce in quanto i tiristori possono essere controllati solo ogni semiperiodo della tensione di rete.

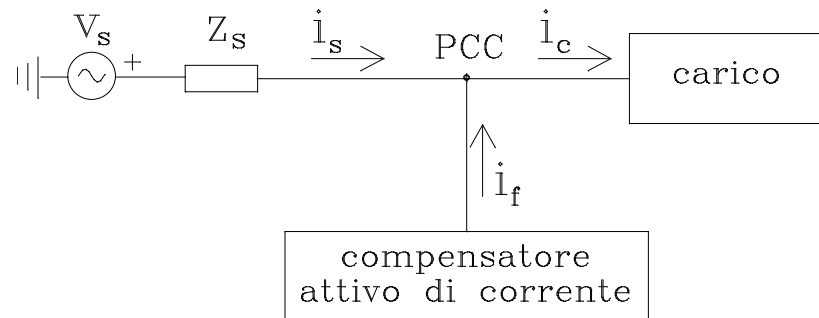
- È fonte di inquinamento armonico perché inietta in rete una corrente distorta:

$$I_h = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot X_L} \left[ \frac{\text{sen}[(h+1)\alpha]}{2(h+1)} + \frac{\text{sen}[(h-1)\alpha]}{2(h-1)} - \cos \alpha \cdot \frac{\text{sen}(h\alpha)}{h} \right], \quad h = 3, 5, 7 \dots$$

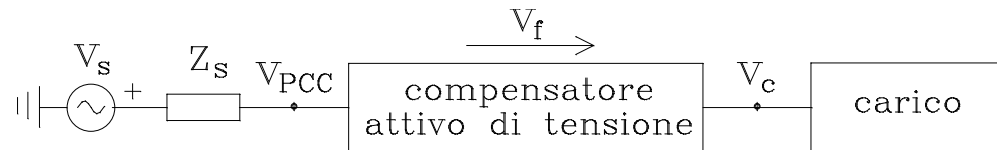
- Se i due tiristori in antiparallelo hanno angoli di innesco diversi vengono introdotte anche armoniche pari.

# SISTEMI ATTIVI DI COMPENSAZIONE

Sono costituiti da convertitori statici cc/ca di tensione (compensatori attivi di tensione) oppure da convertitori statici cc/ca di tensione controllati in corrente (compensatori attivi di corrente). La tensione nel lato in alternata è controllata con tecniche di modulazione che consentono di variarne l'ampiezza in modo pressoché istantaneo.

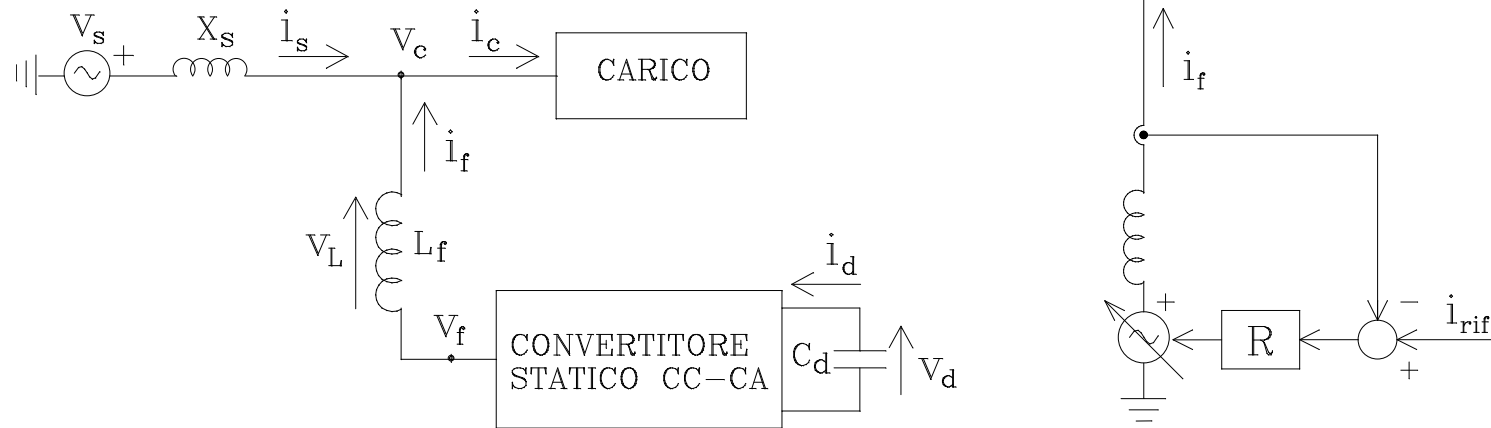


$$i_s = i_c - i_f$$



$$V_{PCC} = V_c - V_f$$

# COMPENSATORI ATTIVI DI CORRENTE



Controllo di corrente

Il riferimento di corrente è calcolato in base all'azione richiesta dal carico inquinante:

- carico distorcente: filtraggio delle armoniche di corrente (filtro attivo);
- carico tempo variante: compensazione delle variazioni di potenza reattiva (compensatore attivo di flicker);
- carico fortemente induttivo: compensazione della potenza reattiva (rifasatore attivo).

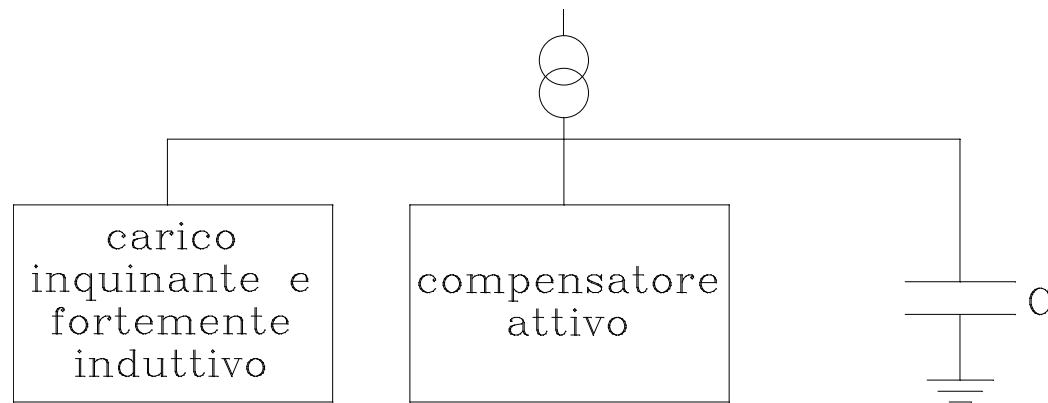
N.B.: la compensazione di potenza reattiva è di tipo diretto.



# COMPENSATORI IBRIDI

La compensazione della potenza reattiva di fatto non viene mai eseguita con i compensatori attivi perché risulterebbe troppo costosa. Nel caso si debba eseguire la compensazione della potenza reattiva unitamente ad un'altra azione di compensazione, la soluzione consiste nell'affiancare un banco di condensatori al compensatore attivo.

Un caso tipico è quello dei compensatori attivi di flicker, in cui il compensatore attivo fornisce le variazioni di potenza reattiva mentre il banco di condensatori fornisce la potenza reattiva media assorbita dal carico.



# TEORIA DELLE POTENZE ISTANTANEE

Definisce le potenze elettriche in funzione dei valori istantanei delle tensioni e delle correnti in gioco e quindi può essere applicata a circuiti che operano in regime qualunque.

Rende possibile la determinazione istantanea delle grandezze da compensare e quindi consente di mettere a frutto le capacità di controllo dei convertitori cc/ca.

La teoria di Akagi e Nabae, detta anche teoria p-q, valida per i sistemi trifase senza neutro, definisce le seguenti potenze:

potenza reale istantanea

$$p(t) = v_{\alpha}(t) \cdot i_{\alpha}(t) + v_{\beta}(t) \cdot i_{\beta}(t) \qquad p = \bar{p} + \tilde{p}$$

potenza immaginaria istantanea

$$q(t) = v_{\beta}(t) \cdot i_{\alpha}(t) - v_{\alpha}(t) \cdot i_{\beta}(t) \qquad q = \bar{q} + \tilde{q}$$

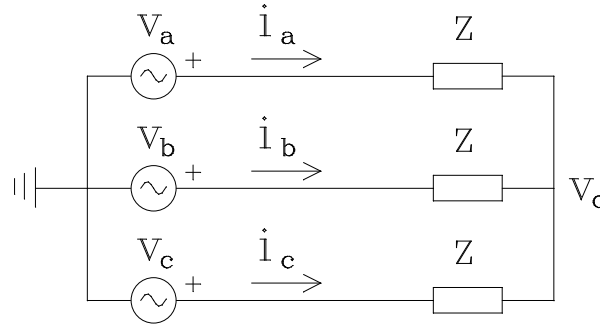
potenza complessa istantanea

$$\underline{s}(t) = (v_{\alpha} + jv_{\beta}) \cdot (i_{\alpha} + ji_{\beta})^* = p(t) + jq(t)$$

# ESEMPLIFICAZIONI

## Sistema trifase sinusoidale

$$\begin{cases} v_a(t) = V_M \cos(\omega t) \\ v_b(t) = V_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c(t) = V_M \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$



$$\begin{cases} i_a(t) = I_M \cos(\omega t - \varphi) \\ i_b(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ i_c(t) = I_M \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \end{cases}$$

$$v_\alpha(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[ v_a(t) - \frac{v_b(t)}{2} - \frac{v_c(t)}{2} \right] = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_M \cos(\omega t)$$

$$v_\beta(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot [v_b(t) - v_c(t)] = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_M \sin(\omega t)$$

$$\begin{cases} i_\alpha(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_M \cos(\omega t - \varphi) \\ i_\beta(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_M \sin(\omega t - \varphi) \end{cases}$$

$$p(t) = v_\alpha(t) \cdot i_\alpha(t) + v_\beta(t) \cdot i_\beta(t) = \frac{3}{2} V_M I_M \cos \varphi = 3VI \cos \varphi = 3P$$

$$q(t) = v_\beta(t) \cdot i_\alpha(t) - v_\alpha(t) \cdot i_\beta(t) = 3VI \sin \varphi = 3Q$$

# ESEMPLIFICAZIONI

Presenza di un'armonica di ordine  $n$  di corrente

$$\begin{cases} i_a(t) = I_M \cos(\omega t - \varphi) + I_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ i_b(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) + I_n \cos\left[n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \varphi_n\right] \\ i_c(t) = I_M \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) + I_n \cos\left[n\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \varphi_n\right] \end{cases}$$

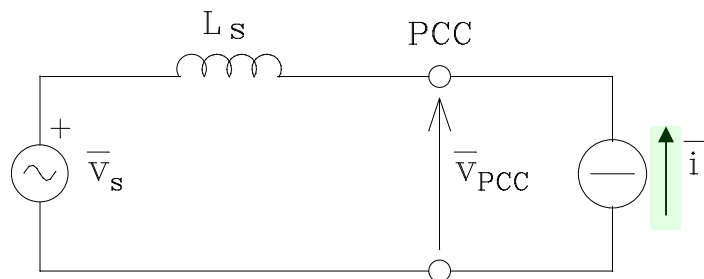
$$\begin{cases} i_\alpha(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} I_M \cos(\omega t - \varphi) + \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ i_\beta(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} I_M \sin(\omega t - \varphi) + r_n \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{cases} \quad r_n = (-1)^{\frac{n+1}{2}}$$

$$p(t) = v_\alpha(t) \cdot i_\alpha(t) + v_\beta(t) \cdot i_\beta(t) = \frac{3}{2} \{V_M I_M \cos \varphi + V_M I_n \cos[(n - r_n)\omega t - \varphi_n]\}$$

$$q(t) = v_\beta(t) \cdot i_\alpha(t) - v_\alpha(t) \cdot i_\beta(t) = \frac{3}{2} \cdot \{V_M I_M \sin \varphi - V_M I_n \sin[(n - r_n)\omega t - \varphi_n]\}$$

# ESEMPLIFICAZIONI

## Carico lineare tempo variante



$$\bar{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_M e^{j\omega t}$$

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} I_M [1 + m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m)] \cos(\omega t - \varphi) \\ \sqrt{\frac{3}{2}} I_M [1 + m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m)] \sin(\omega t - \varphi) \end{bmatrix}$$

$$\bar{i} = i_\alpha + j i_\beta = \sqrt{\frac{3}{2}} I_M \left( 1 + m \frac{e^{j(\omega_m t - \varphi_m)} + e^{-j(\omega_m t - \varphi_m)}}{2} \right) \cdot e^{j(\omega t - \varphi)}$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} I_M e^{-j\varphi} \left[ 1 + \frac{m}{2} \left( e^{j(\omega_m t - \varphi_m)} + e^{-j(\omega_m t - \varphi_m)} \right) \right] \cdot e^{j\omega t}$$

# ESEMPLIFICAZIONI

## Carico lineare tempo variante: tensione del PCC

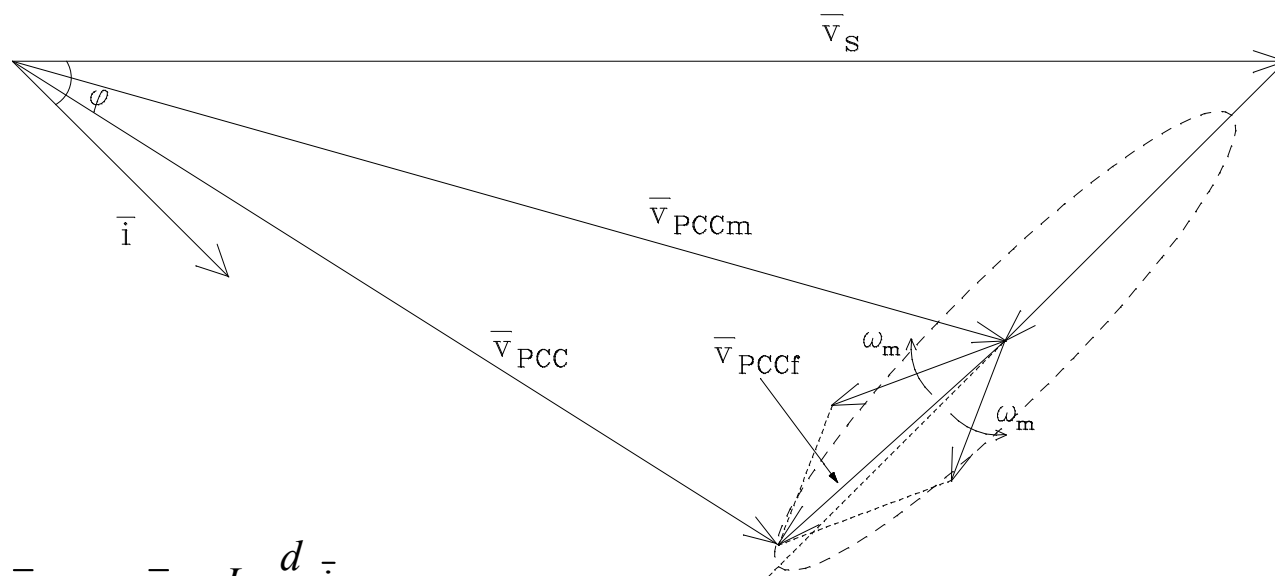


Diagramma vettoriale  
rappresentante la  
tensione del PCC

$$\begin{aligned}\bar{v}_{PCC} &= \bar{v}_s - L_s \frac{d}{dt} \bar{i} \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} V_M \left\{ 1 + \frac{\omega L_s I_M}{V_M} e^{-j(\varphi + \pi/2)} \left[ 1 + \frac{m}{2} \left( 1 + \frac{\omega_m}{\omega} \right) e^{j(\omega_m t - \varphi_m)} + \frac{m}{2} \left( 1 - \frac{\omega_m}{\omega} \right) e^{-j(\omega_m t - \varphi_m)} \right] \right\} \cdot e^{j\omega t}\end{aligned}$$

$$\bar{v}_{PCCm} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_M \left[ 1 + \frac{\omega L_s I_M}{V_M} e^{-j(\varphi + \pi/2)} \right] e^{j\omega t}$$

$$\bar{v}_{PCCf} = \sqrt{\frac{3}{2}} \omega L_s I_M e^{-j(\varphi + \pi/2)} \left[ \frac{m}{2} \left( 1 + \frac{\omega_m}{\omega} \right) e^{j(\omega_m t - \varphi_m)} + \frac{m}{2} \left( 1 - \frac{\omega_m}{\omega} \right) e^{-j(\omega_m t - \varphi_m)} \right] \cdot e^{j\omega t}$$

# ESEMPLIFICAZIONI

## Carico lineare tempo variante: potenze istantanee

$$\begin{aligned}\bar{s}(t) &= \bar{v}_s \cdot \bar{i}^* = p(t) + jq(t) = \\ &= \frac{3}{2} V_M I_M e^{j\varphi} \left[ 1 + \frac{m}{2} \left( e^{-j(\omega_m t - \varphi_m)} + e^{j(\omega_m t - \varphi_m)} \right) \right] = \frac{3}{2} V_M I_M [1 + m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m)] \cdot e^{j\varphi}\end{aligned}$$

$$p(t) = \frac{3}{2} [1 + m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m)] \cdot V_M I_M \cos \varphi \quad q(t) = \frac{3}{2} [1 + m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m)] \cdot V_M I_M \sin \varphi$$

$$\bar{p} = \frac{3}{2} V_M I_M \cos \varphi \quad \bar{q} = \frac{3}{2} V_M I_M \sin \varphi$$

$$\tilde{p} = \frac{3}{2} m \cos(\omega_m t - \varphi_m) \cdot V_M I_M \cos \varphi \quad \tilde{q} = \frac{3}{2} m \cos(\omega_m t - \varphi_m) \cdot V_M I_M \sin \varphi$$

# FILTRAGGIO DELLE ARMONICHE DI CORRENTE

Strategia di compensazione:

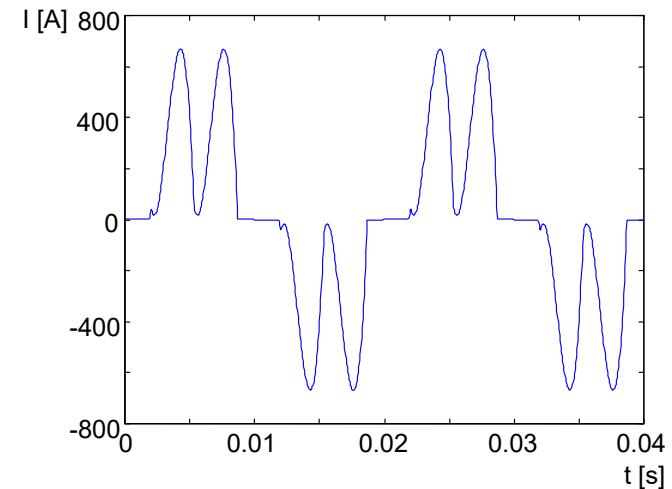
$$\begin{cases} p_f = \tilde{p} \\ q_f = \tilde{q} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_s = p - p_f = \bar{p} \\ q_s = q - q_f = \bar{q} \end{cases}$$

$p_f, q_f$  = potenza reale istantanea e  
potenza immaginaria istantanea  
erogate dal compensatore

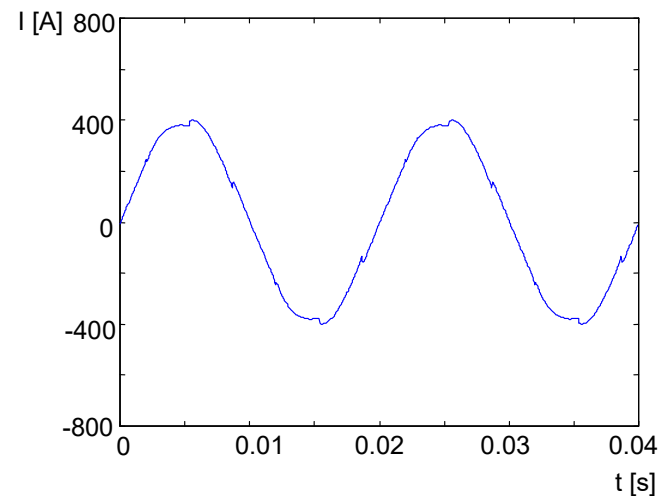
$p_s, q_s$  = potenza reale istantanea e  
potenza immaginaria istantanea  
erogate dalla rete

$$i_{\alpha f\_rif} = \frac{v_{\alpha} \cdot p_f - v_{\beta} \cdot q_f}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}$$

$$i_{\beta f\_rif} = \frac{v_{\beta} \cdot p_f + v_{\alpha} \cdot q_f}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}$$



Corrente di linea distorta



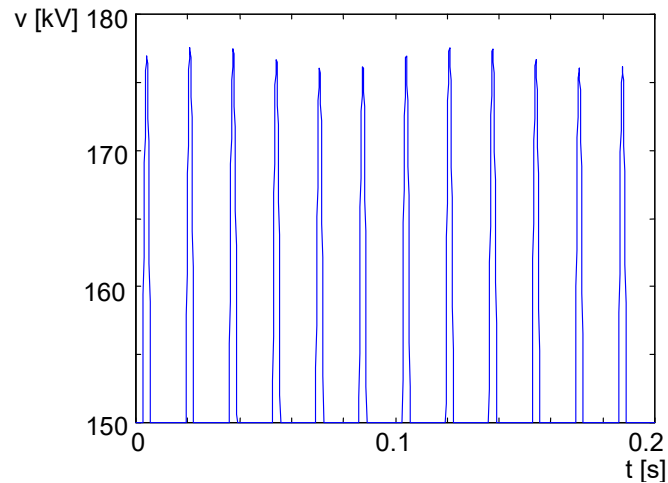
Corrente di linea compensata



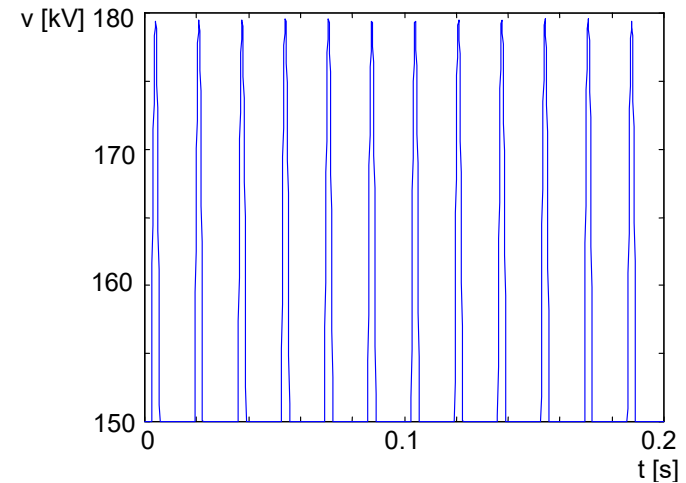
# COMPENSAZIONE DEL FLICKER E RIFASAMENTO

Strategia di compensazione del flicker:

$$\begin{cases} p_f = 0 \\ q_f = \tilde{q} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_s = p - p_f = p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q_s = q - q_f = \bar{q} \end{cases}$$



Tensione in assenza di compensazione



Tensione in presenza di compensazione

Strategia di rifasamento:

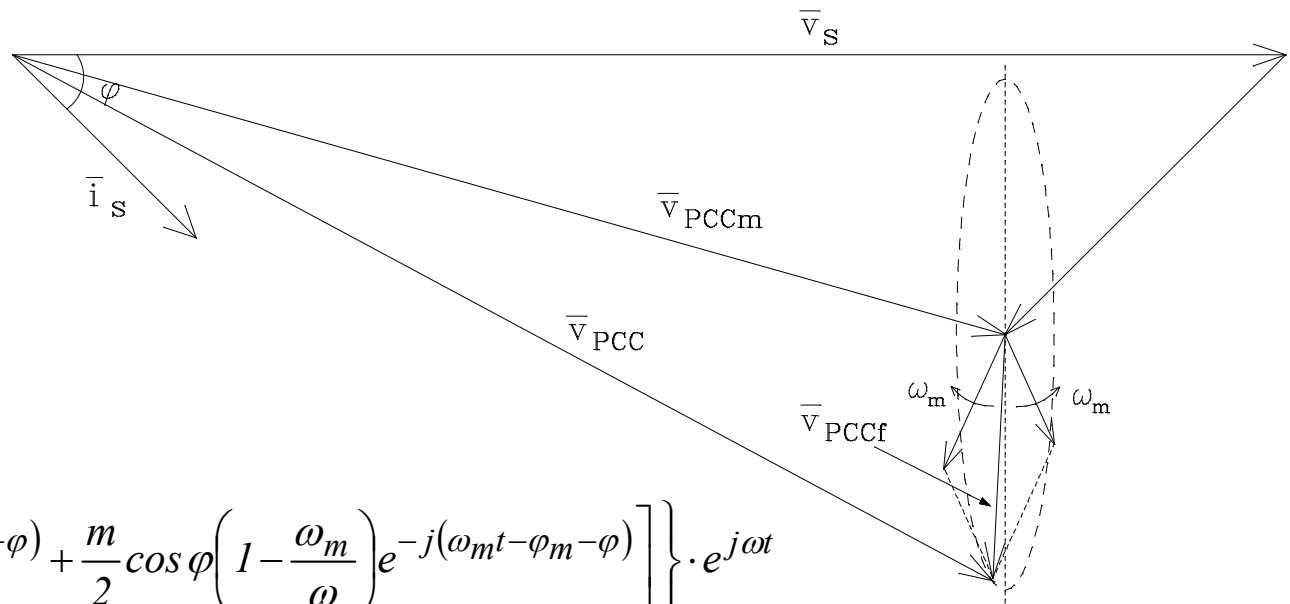
$$\begin{cases} p_f = 0 \\ q_f = \bar{q} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_s = p - p_f = p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q_s = q - q_f = \tilde{q} \end{cases}$$

# ESEMPIO DI COMPENSAZIONE DI CARICO LINEARE TEMPO VARIANTE

$$q_s = \bar{q} = \frac{3}{2} V_M I_M \sin \varphi \quad \rightarrow \quad \underline{s}_s(t) = \underline{\bar{s}}_s + \underline{\tilde{s}}_s = p + jq_s = \bar{p} + \tilde{p} + j\bar{q}$$

$$\bar{i}_s = \left( \frac{\bar{s}_s}{\bar{v}_s} \right)^* = \left\{ \frac{\frac{3}{2} [1 + m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m)] V_M I_M \cos \varphi + j \frac{3}{2} V_M I_M \sin \varphi}{\sqrt{\frac{3}{2}} V_M e^{j\omega t}} \right\}^*$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} I_M \left[ e^{-j\varphi} + m \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m) \right] \cdot e^{j\omega t} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_M \left\{ e^{-j\varphi} + \frac{m}{2} \cdot \cos \varphi \cdot \left[ e^{j(\omega_m t - \varphi_m)} + e^{-j(\omega_m t - \varphi_m)} \right] \right\} \cdot e^{j\omega t}$$

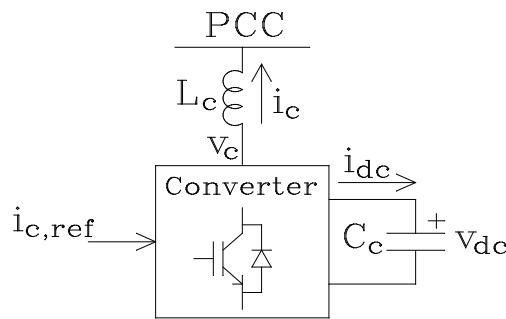


$$\bar{v}_{PCC} = \bar{v}_s - L_s \frac{d}{dt} \bar{i}_s$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} V_M \left\{ 1 + \frac{\omega L_s I_M}{V_M} e^{-j(\varphi + \pi/2)} \right\}$$

$$\left[ 1 + \frac{m}{2} \cos \varphi \left( 1 + \frac{\omega_m}{\omega} \right) e^{j(\omega_m t - \varphi_m + \varphi)} + \frac{m}{2} \cos \varphi \left( 1 - \frac{\omega_m}{\omega} \right) e^{-j(\omega_m t - \varphi_m - \varphi)} \right] \cdot e^{j\omega t}$$

# CONDENSATORE NEL LATO IN CONTINUA



Ipotesi semplificative:

- il controllo di corrente del convertitore è ideale  $\Rightarrow i_c = i_{c,ref}$
- si trascurano le armoniche nel lato in alternata del convertitore dovute alla modulazione,
- si trascura l'ondulazione della tensione nel lato in continua  $V_{dc}$ ,
- si trascurano le perdite nel convertitore,
- si trascura la caduta sull'induttanza di linea  $L_s$ .

$$\bar{v}_c = \bar{v}_s + L_c \frac{d}{dt} \bar{i}_c$$

$$\bar{i}_{c,ref} = \left( \frac{\mathbf{s}_c}{\bar{v}_s} \right)^* \quad \mathbf{s}_c = \text{potenza complessa istantanea richiesta al compensatore}$$

Dal bilancio fra la potenza istantanea nel lato in continua e la potenza reale istantanea nel lato in alternata del convertitore risulta:

$$i_{dc} = -\frac{1}{V_{dc}} \cdot \text{Re}(\bar{v}_c \cdot \bar{i}_c^*)$$

$$C_c = \Delta Q_{\max} / \Delta V_{dc,M} \quad \Delta V_{dc,M} = \text{fluttuazione massima di } V_{dc} \text{ ammessa}$$

*Compensazione della potenza reattiva*

$$V_{dc} i_{dc} = 3V_c I_c \cos \varphi \quad \varphi = \pi/2 \rightarrow i_{dc} = 0$$

# CONDENSATORE NEL LATO IN CONTINUA

*Flicker: compensazione della sola potenza immaginaria istantanea fluttuante*

$$\mathbf{s}_c = j\tilde{q} = j\frac{3}{2}m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m) \cdot V_M I_M \text{sen} \varphi$$

$$i_{dc} = \frac{3m^2 \omega_m L_c I_M^2}{4V_{dc}} \text{sen}^2 \varphi \cdot \text{sen}(2\omega_m t - 2\varphi_m)$$

$$\Delta Q_{\max} = \frac{1}{\omega_m} \int_{\varphi_m}^{\varphi_m + \pi/2} i_{dc} d(\omega_m t) = \frac{3}{4V_{dc}} m^2 L_c I_M \text{sen}^2 \varphi$$

$$C_c = \frac{3m^2 L_c I^2 \text{sen}^2 \varphi}{2V_{dc} \Delta V_{dc,M}}, \quad I = I_M / \sqrt{2}$$

# CONDENSATORE NEL LATO IN CONTINUA

*Flicker: compensazione della potenza immaginaria istantanea fluttuante e della potenza reale istantanea fluttuante*

$$\mathbf{s}_c = \tilde{p} + j\tilde{q} = \frac{3}{2}V_M I_M [\cos \varphi \cdot m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m) + jm \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m)]$$

$$i_{dc} = \frac{3mI_M}{2V_{dc}} \left[ -V_M \cos \varphi \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_m) + \frac{1}{2} m \omega_m L_c I_M \cdot \sin(2\omega_m t - 2\varphi_m) \right]$$

Normalmente  $(1/2)m\omega_m L_c I_M < V_M \cos \varphi$ , per cui l'integrazione per ottenere  $\Delta Q_{\max}$  può essere fatta su metà del periodo del primo termine fra parentesi quadra, da cui risulta:

$$C_c = \frac{6mVI \cos \varphi}{\omega_m V_{dc} \Delta V_{dc,M}}, \quad V = V_M / \sqrt{2}, I = I_M / \sqrt{2}$$

Il rapporto fra il condensatore appena calcolato e quello calcolato nel caso di compensazione della sola potenza immaginaria fluttuante risulta:

$$r = \frac{4V \cos \varphi}{m\omega_m L_c I \sin^2 \varphi}$$