

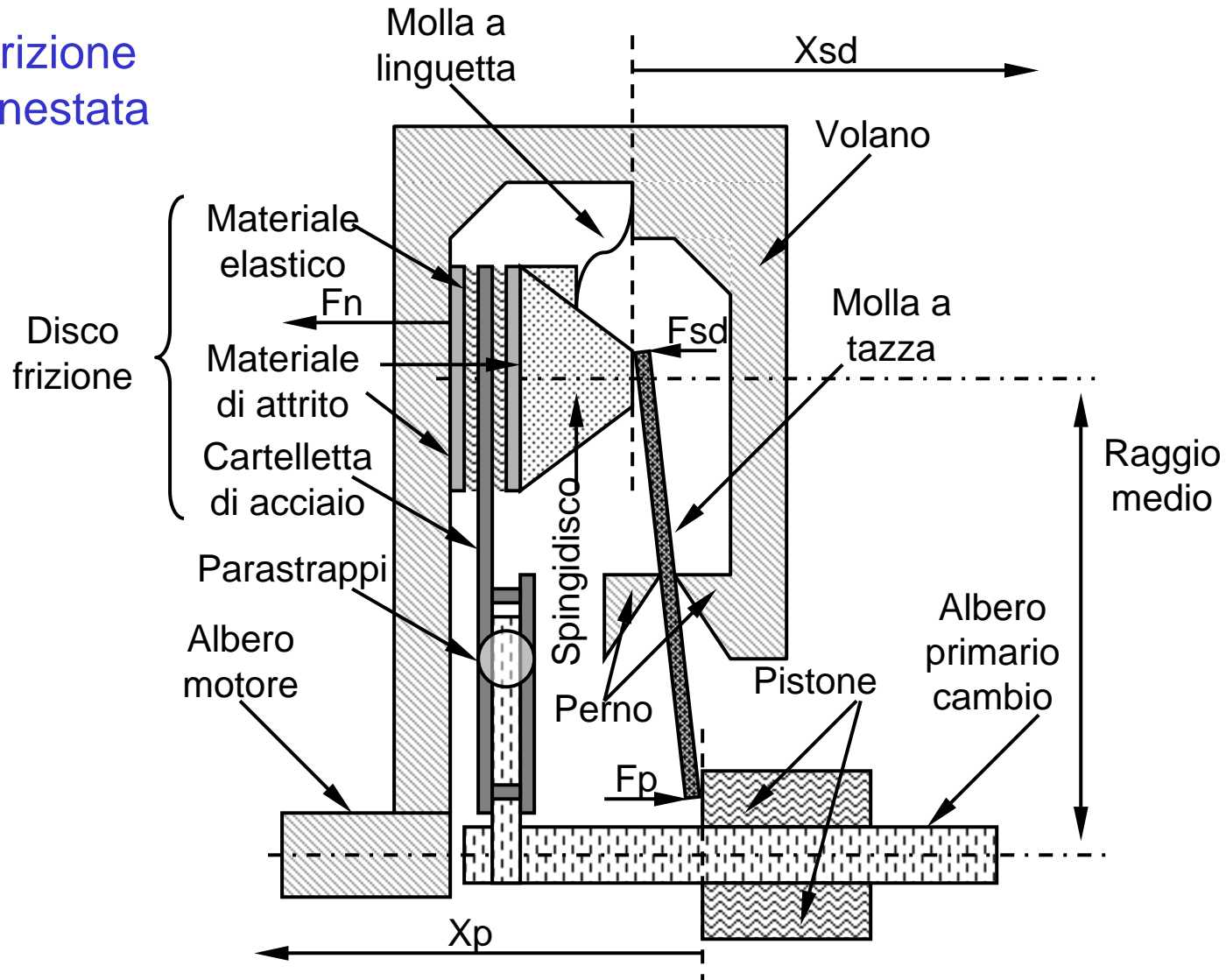
---

Sistema di Controllo di una Frizione a Secco  
per Cambi Manuali Robotizzati  
(AMT: Automated Manual Transmission)

---

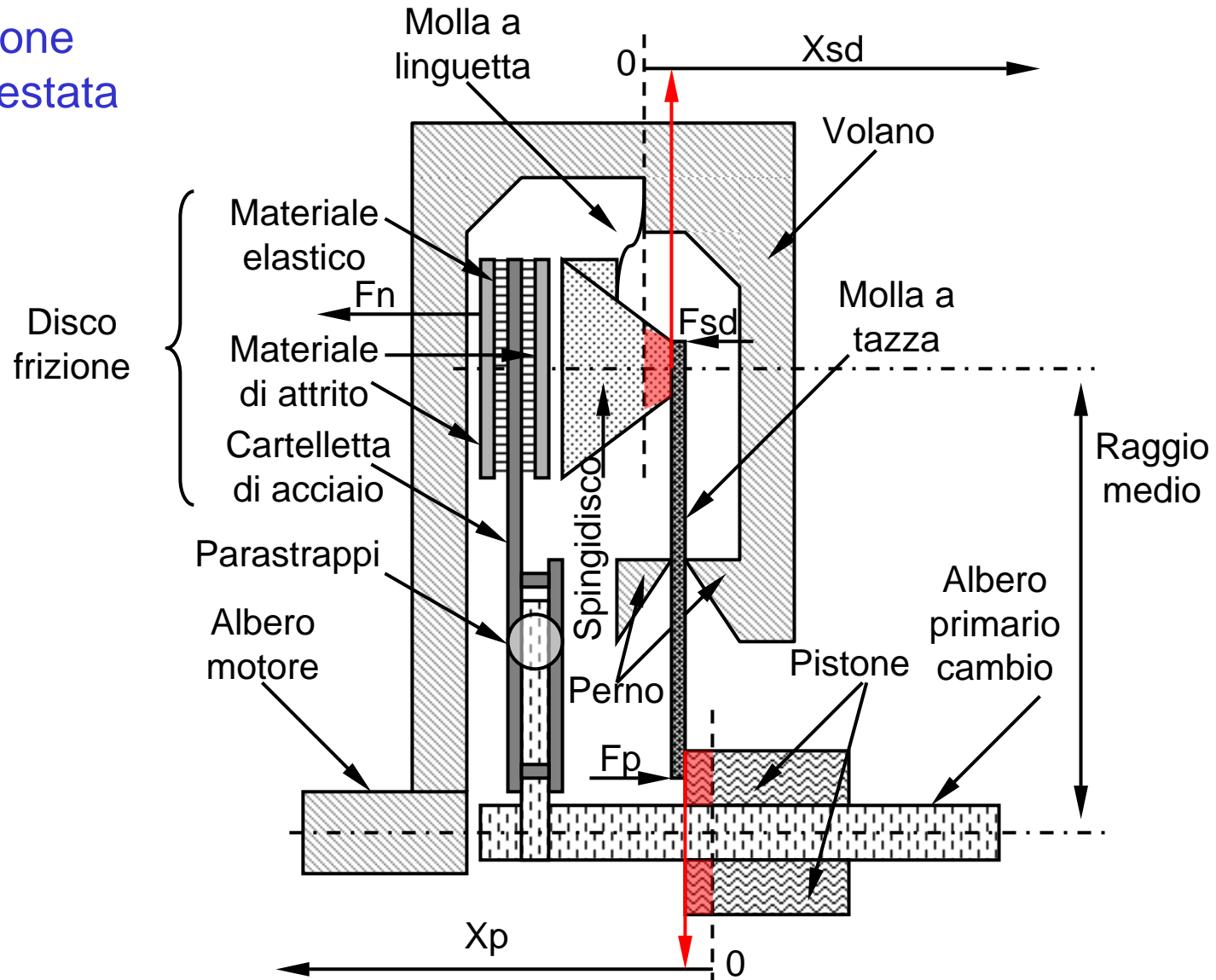
# Schema Meccanico di una Frizione (1)

Frizione  
Innestata

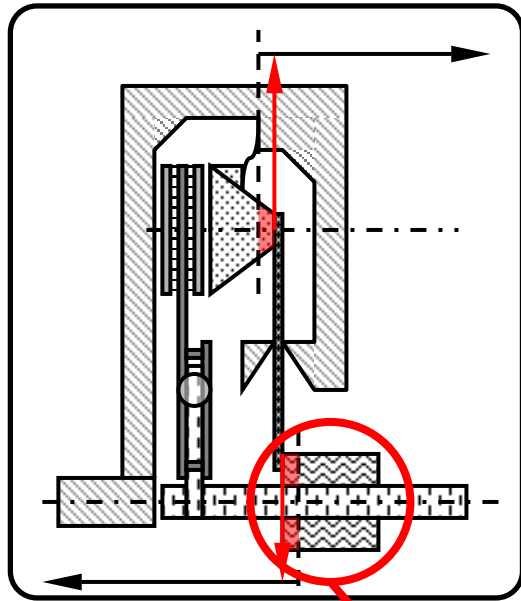


# Schema Meccanico di una Frizione (2)

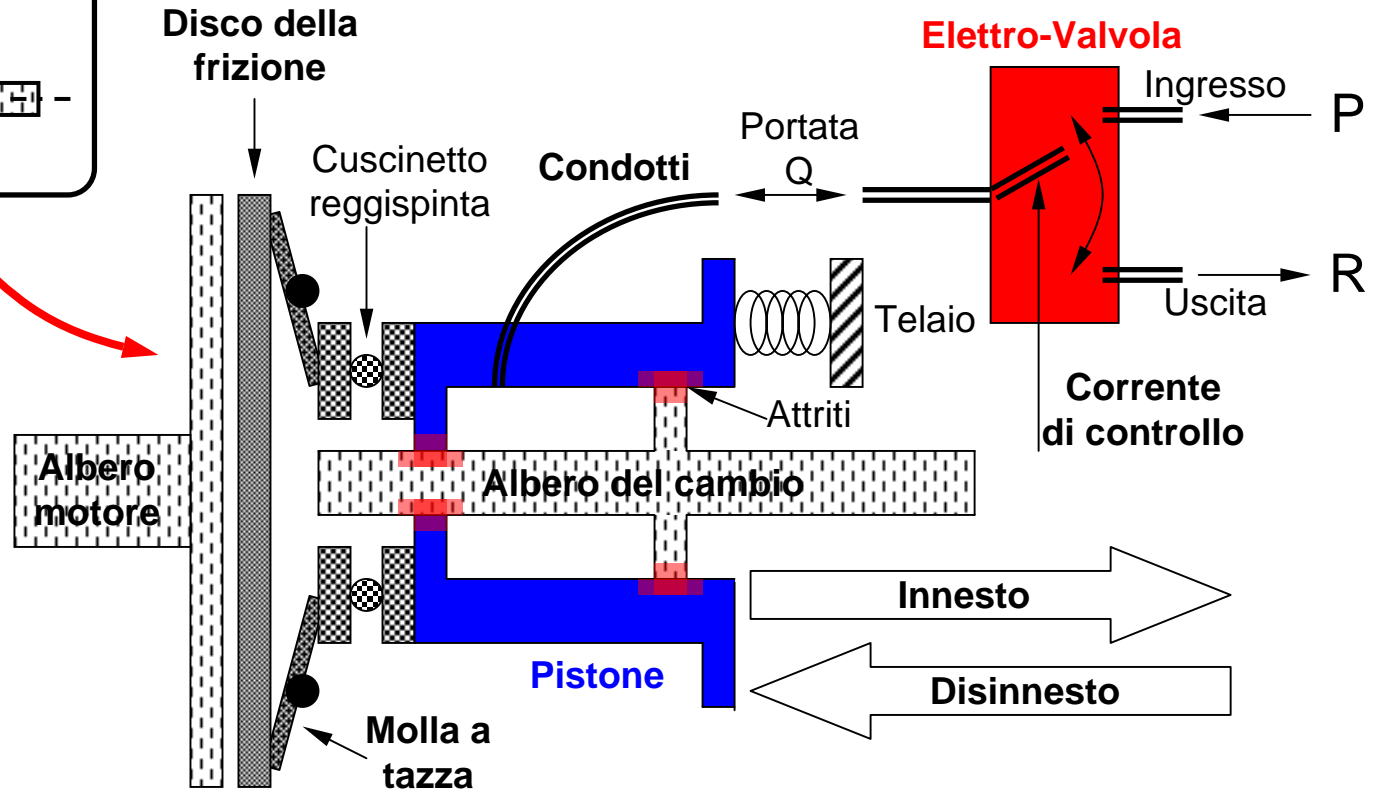
## Frizione Disinnestata



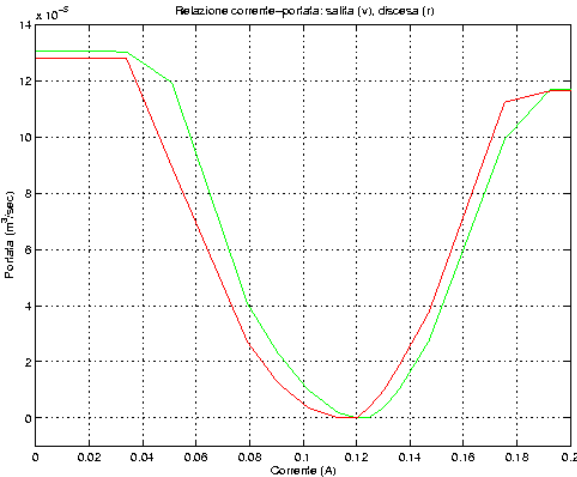
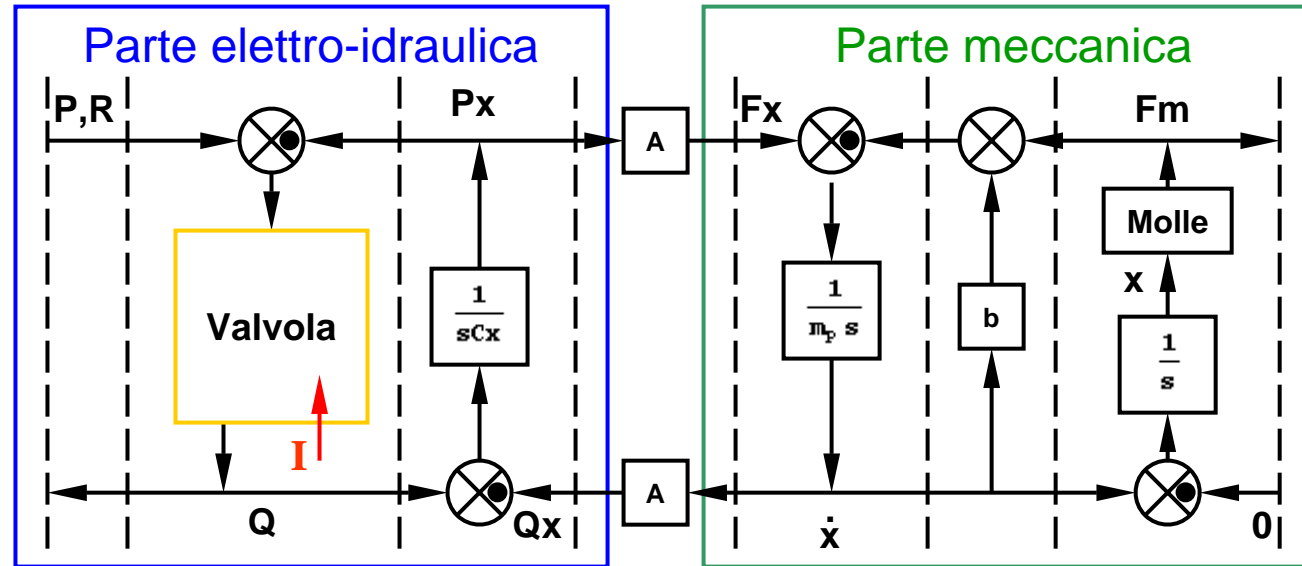
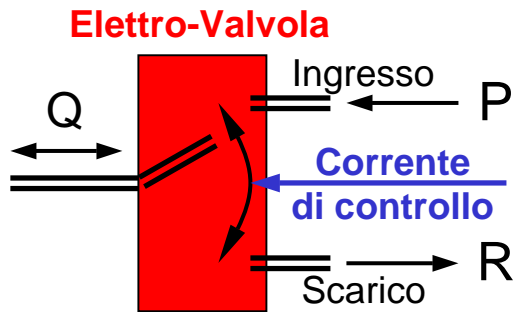
# Descrizione Attuatore Idraulico per l'Azionamento della Frizione



La forza sul pistone che muove la molla a tazza (normalmente esercitata dal pilota con il pedale) viene fornita tramite un circuito idraulico controllato attraverso un'elettrovalvola.



# Modello Attuatore Idraulico: elettro-valvola

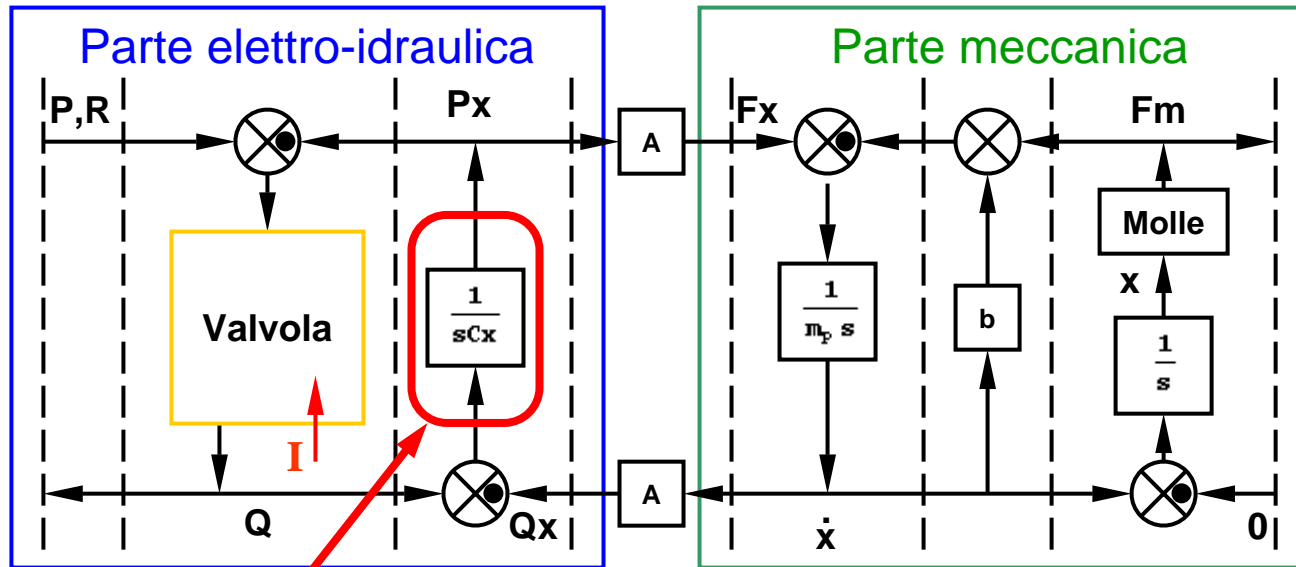


Caratteristica statica corrente-portata

La valvola, tramite la corrente di controllo, modifica le dimensioni degli orifizi tra la camera del pistone e le pressioni  $P$ ,  $R$  di alimentazione.

La differenza tra le pressioni  $P$ ,  $R$  e la pressione  $P_x$  nella camera del pistone determina la portata di olio  $Q$  che permette il movimento del pistone sotto l'azione della pressione  $P_x$ .

# Modello Attuatore Idraulico: camera del pistone

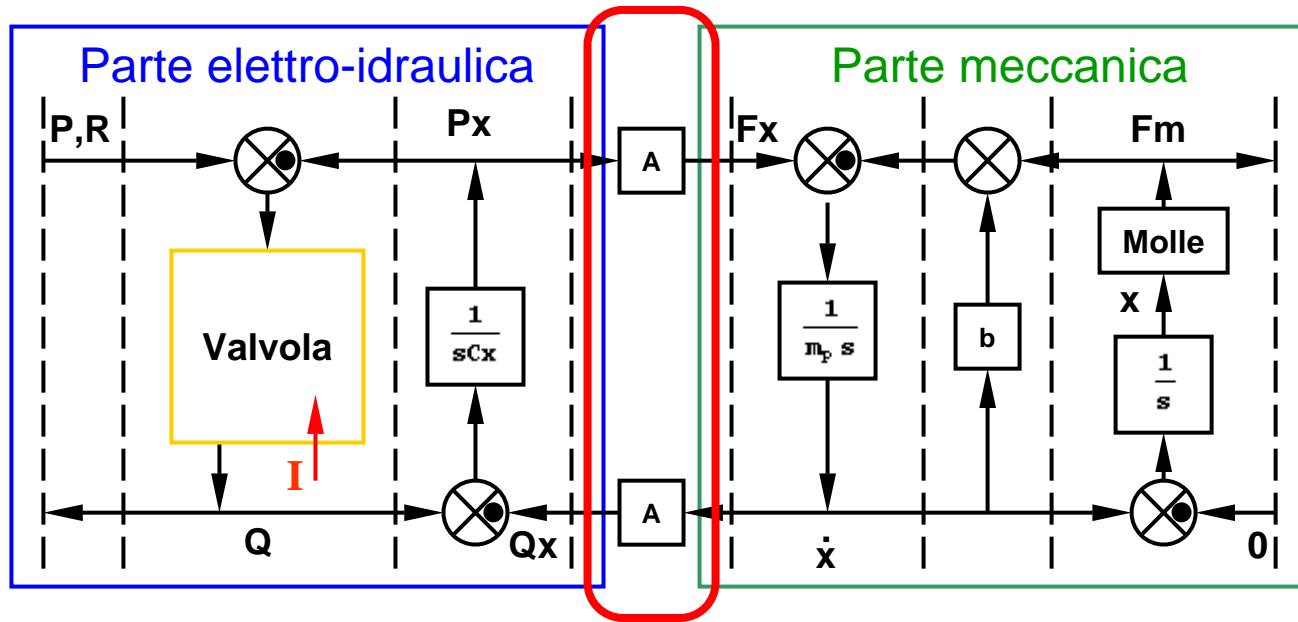


La camera del pistone si può modellare in modo semplificato tramite una (piccola) capacità idraulica che fornisce una pressione integrando i flussi di olio in entrata e in uscita.

Il significato fisico della capacità idraulica è legato alla comprimibilità dell'olio, all'elasticità dei condotti idraulici e all'elasticità della camera.

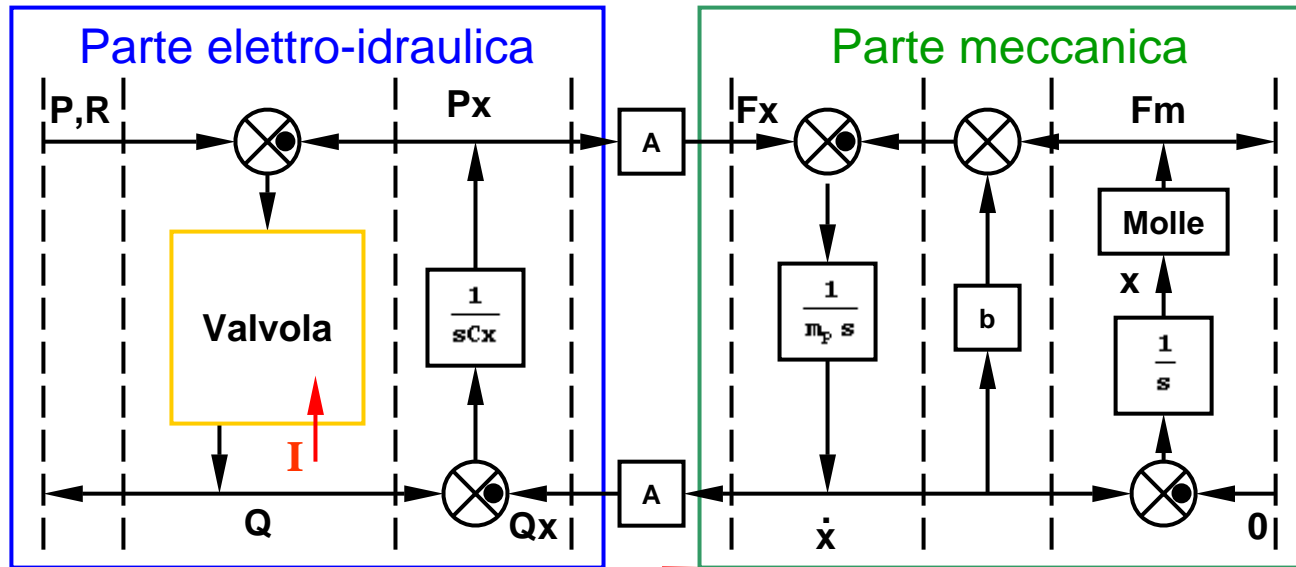
La capacità idraulica permette di considerare nel modello il principale effetto dinamico dovuto ai collegamenti idraulici.

# Modello Attuatore Idraulico



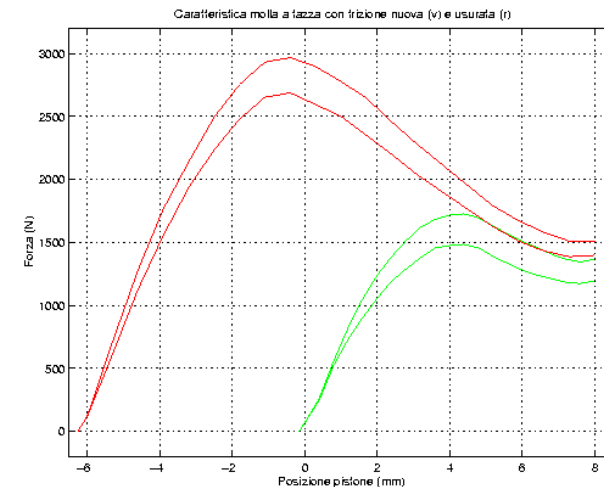
L'area  $A$  del pistone su cui agisce la pressione  $P_x$  rappresenta l'elemento di trasformazione di energia fra il dominio idraulico e il dominio meccanico

# Modello Attuatore Idraulico: pistone



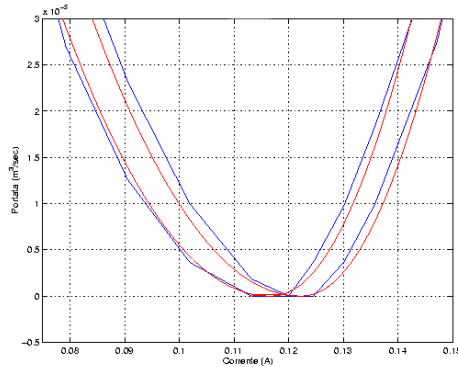
La dinamica del pistone è descritta tramite un sistema massa-molla-ammortizzatore di tipo non-lineare a causa di:

- attriti di primo distacco e coulombiani causati principalmente dalle tenute idrauliche.
- caratteristica non lineare della molla a tazza che cambia in funzione del grado di usura dei dischi.



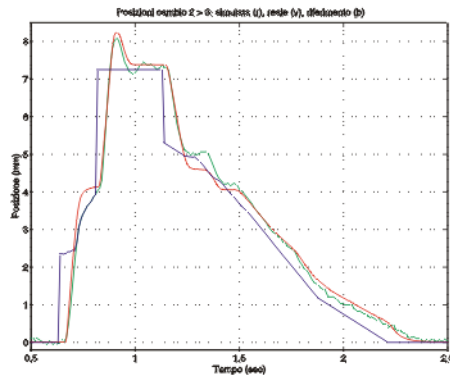
Caratteristica della molla a tazza per diversi gradi di usura dei dischi

# Validazione Sperimentale Modello Attuatore Idraulico



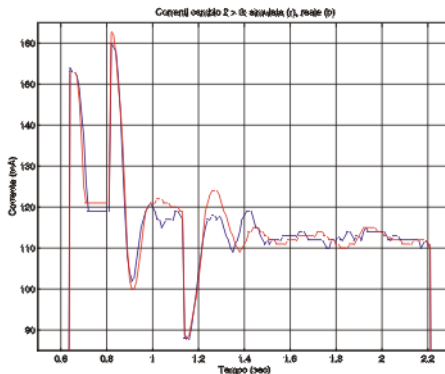
- **Simulazioni sul comportamento statico e dinamico della valvola**

Esempio Caratteristica statica della valvola:  
misure sperimentali (blu)  
risultati delle simulazioni (rosso)



- **Simulazioni in catena aperta (senza regolatore):  
identificazione dei parametri e verifica del modello**

Esempio Cambio marcia, posizione del pistone:  
riferimento di posizione (blu)  
posizione rilevata sperimentalmente (verde)  
posizione simulata con il modello (rosso)



- **Simulazioni in catena chiusa (con regolatore):  
verifica del regolatore e conferma del modello**

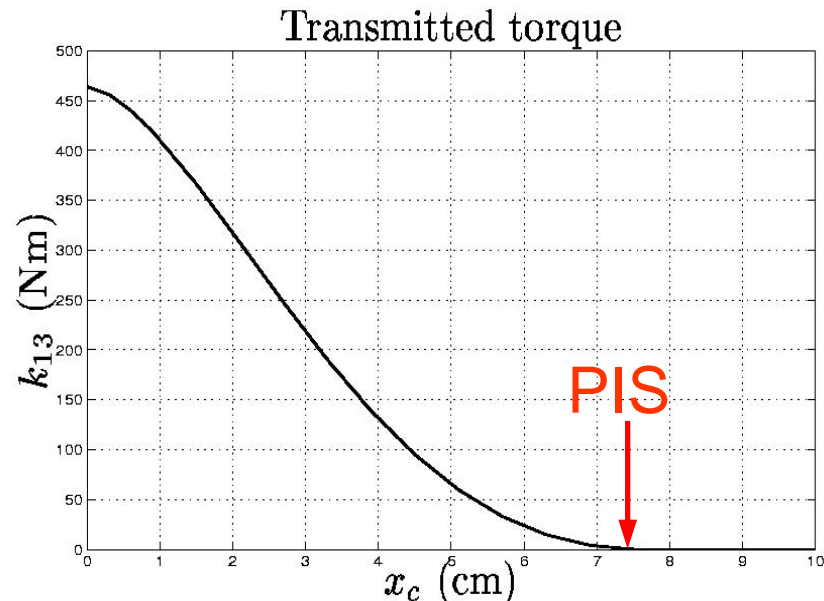
Esempio Cambio marcia, corrente di controllo:  
corrente misurata sperimentalmente (blu)  
corrente simulata con il modello (rosso)

Obiettivo: controllare la COPPIA trasmessa dalla frizione in ogni condizione operativa.

## Problemi:

- non esistono sensori di coppia economici che possano essere montati sul primario cambio per stimare la coppia trasmessa;
- la coppia viene stimata tramite la posizione del pistone e dalla caratteristica di trasmissibilità della frizione;
- La caratteristica di trasmissibilità della frizione varia con la temperatura e con l'usura dei dischi;

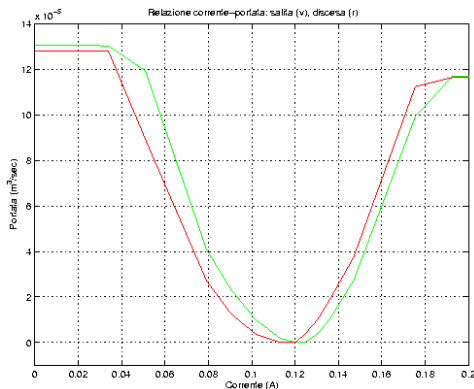
Sono necessari un buon controllo di posizione del pistone e una buona stima della caratteristica di trasmissibilità per controllare correttamente la coppia trasmessa dalla frizione



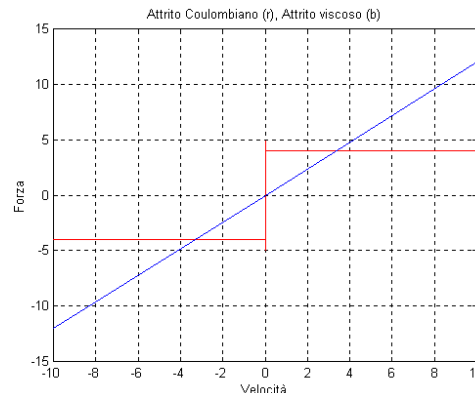
# Controllo di posizione del pistone

L'attuatore idraulico della frizione è caratterizzato da numerose non-linearità che complicano il controllo di posizione del pistone:

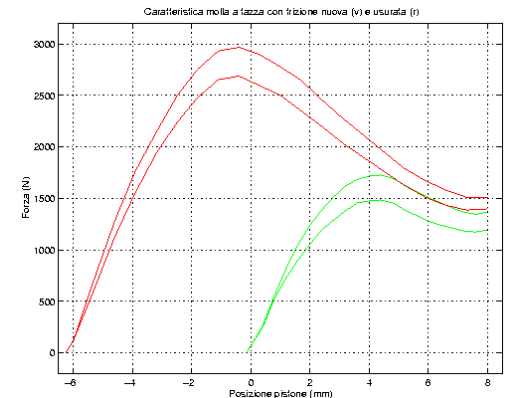
- caratteristica ingresso (corrente, pressioni) uscita (portata) della valvola;
- attriti di primo distacco e coulombiani dovuti principalmente agli anelli di tenuta idraulici;
- caratteristica fortemente non lineare della molla a tazza;
- comportamento della molla a tazza che varia con l'usura dei dischi della frizione;
- isteresi della molla a tazza;



Caratteristica statica della valvola



Attriti coulombiani e di primo distacco

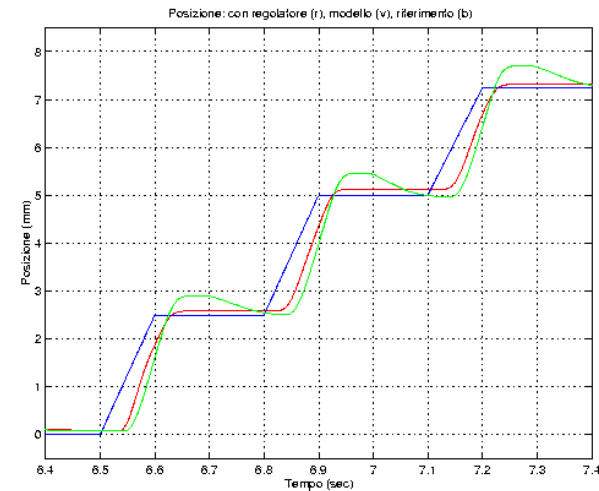
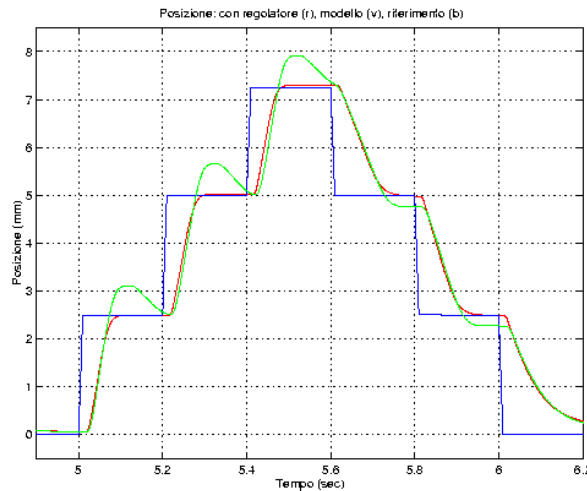
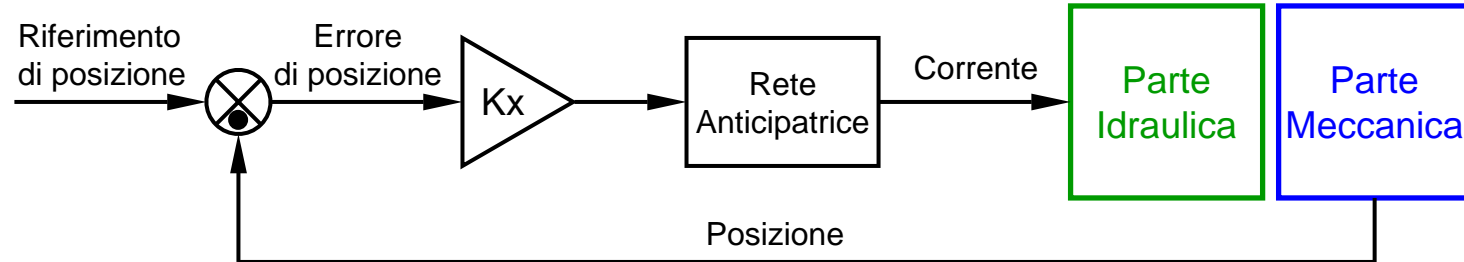


Caratteristica molla a tazza

# Controllo dell'Attuatore Frizione (1)

## Regolatore con rete anticipatrice e tempo di campionamento 10ms:

- soluzione relativamente semplice
- non richiede interventi consistenti sul sistema
- buoni risultati

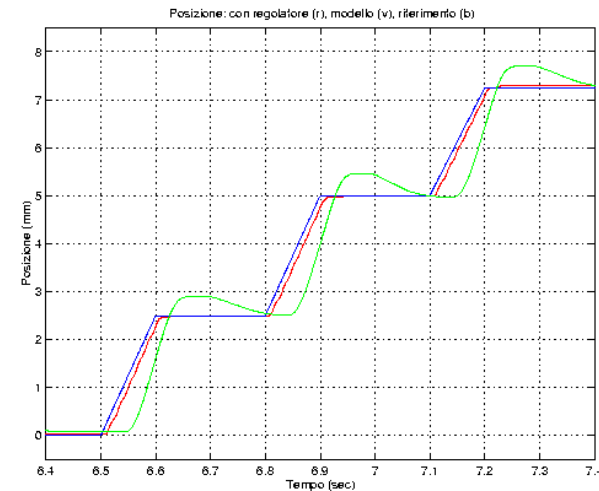
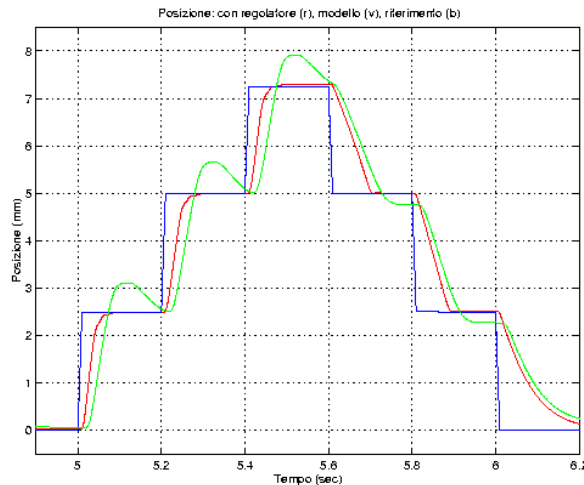
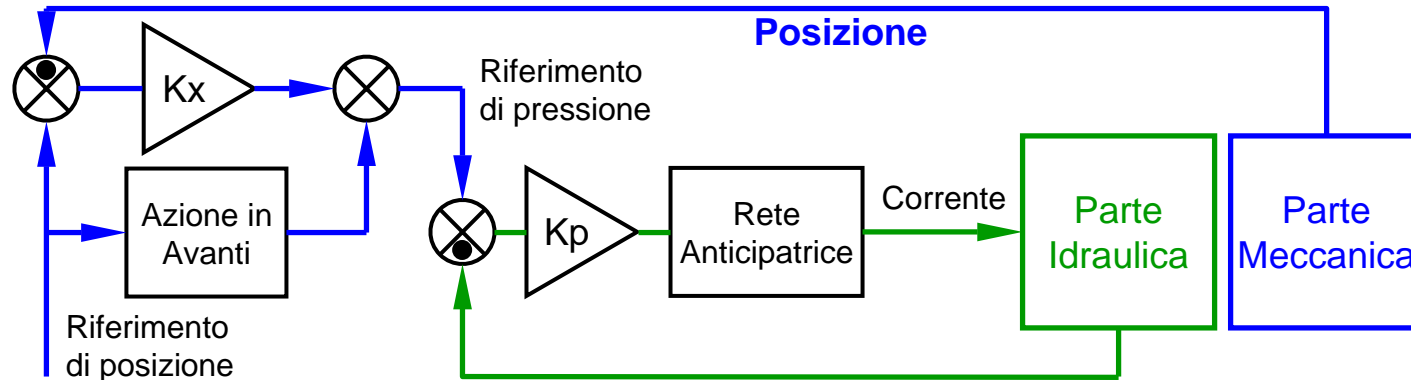


Risultati delle simulazioni: riferimento di posizione (**blu**), risposta con il regolatore originale (**verde**), risposta con il regolatore proposto (**rosso**)

# Controllo dell'Attuatore Frizione (2)

**Regolatore a doppio anello di retroazione con sensore di pressione, rete anticipatrice, azione in avanti e tempo di campionamento 1ms:**

- soluzione complessa che richiede interventi consistenti sul sistema
- ottimi risultati



Risultati delle simulazioni: riferimento di posizione (**blu**), risposta con il regolatore originale (**verde**), risposta con il regolatore proposto (**rosso**)

## Obiettivo:

trasmettere la coppia richiesta dal pilota (tramite il pedale dell'acceleratore) alla trasmissione (o generare l'accelerazione richiesta) mantenendo un “buon comportamento” sui giri motore indipendentemente dalla differenza di velocità angolare tra albero motore e primario cambio.

## Implementazione:

In generale è necessario controllare contemporaneamente la coppia erogata dal motore e la posizione della frizione.

Le strategie di controllo della frizione e del motore per la gestione della partenza intervengono sui segnali di controllo (variabili manipolabili)

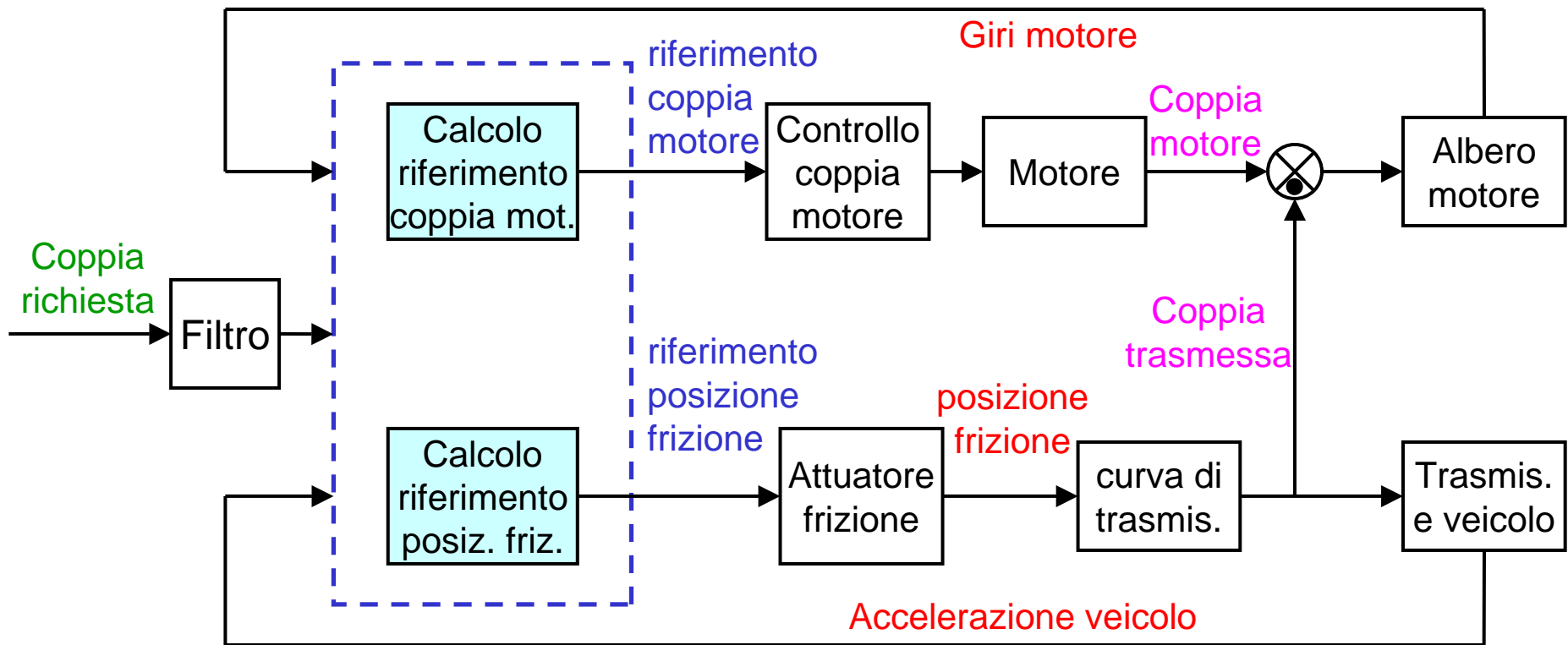
- richiesta (riferimento) di coppia al motore
- richiesta (riferimento) di posizione della frizione

Le variabili da controllare sono:

- i giri motore (per evitare oscillazioni, spegnimento o fuori giri)
- la coppia trasmessa o l'accelerazione del veicolo

La coppia richiesta dal pilota rappresenta il segnale di ingresso per il sistema di controllo.

# Schema Generale di Controllo della Frizione in Partenza



Segnale di ingresso: coppia o accelerazione richiesta (pedale acceleratore)

Variabili di controllo: riferimento coppia motore, riferimento posizione frizione

Grandezze misurate: giri motore, posizione frizione, accelerazione veicolo

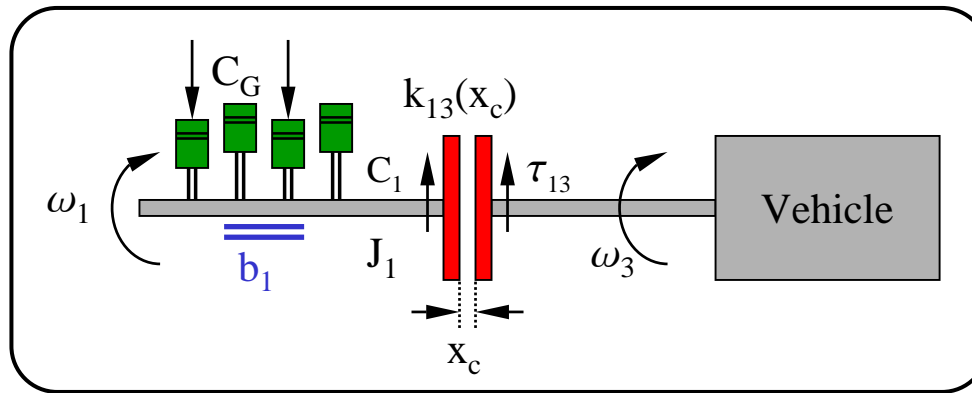
Grandezze stimate: coppia motore, coppia trasmessa

# Strategie di Controllo della Frizione in Partenza

		Sistema di Controllo della Frizione	
		Lento	Veloce
Sistema di Controllo del Motore	Lento	③ Strategia di Controllo motore + frizione integrata	① Controllo (prevalentemente) feedforward del motore + Controllo in retroazione della frizione
	Veloce	② Controllo (prevalentemente) feedforward della frizione + Controllo in retroazione della coppia motore	Strategia a scelta

## Obiettivo:

trasmettere la coppia motore (richiesta dal pilota) alla trasmissione indipendentemente dalla differenza di velocità angolare tra albero motore e primario cambio.



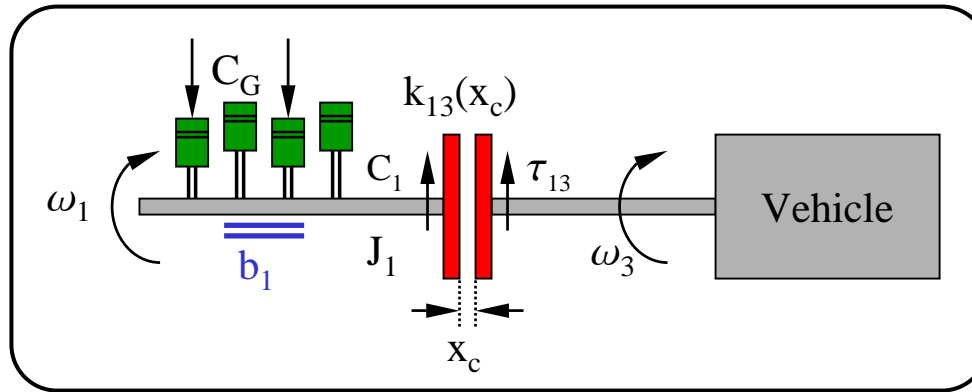
$$J_1 \dot{\omega}_1 = C_1 - k_{13}(x_c) \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_3) = C_1 - \tau_{13}$$

↑  
Coppia utile al volano

↑  
Coppia trasmessa dalla frizione

↑  
Coppia sulla trasmissione

# Controllo della Frizione in Partenza (caso 1)



$$J_1 \dot{\omega}_1 = C_1 - k_{13}(x_c) \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_3) = C_1 - \tau_{13}$$

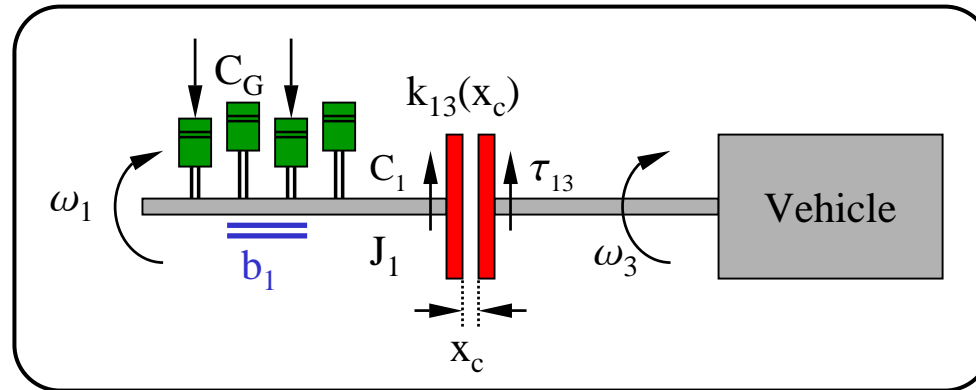
Coppia utile al volano

Coppia trasmessa dalla frizione

Coppia sulla trasmissione

Se l'accelerazione angolare dell'albero motore è trascurabile, la coppia sulla trasmissione è circa uguale alla coppia al volano

$$C_1 \simeq \tau_{13}$$



$$J_1 \dot{\omega}_1 = C_1 - k_{13}(x_c) \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_3) = C_1 - \tau_{13}$$

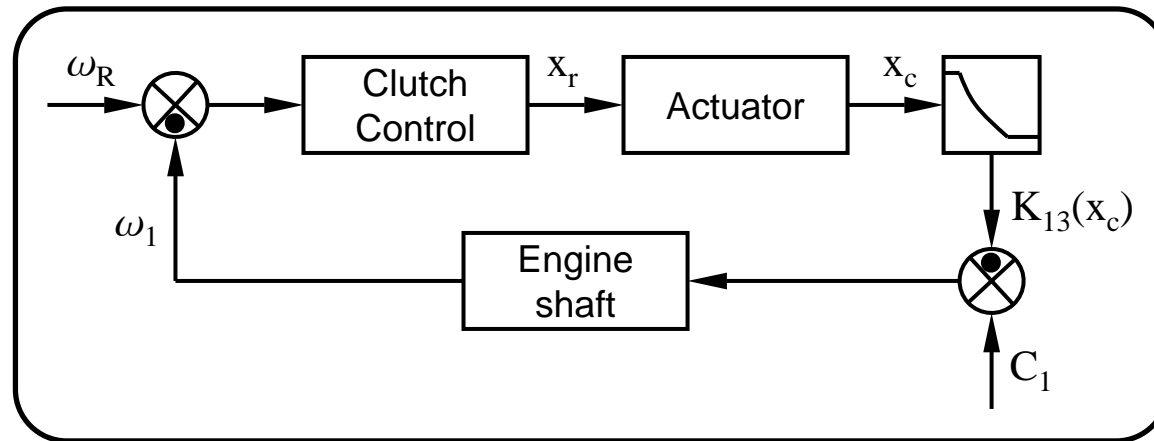
## Strategia di controllo della frizione:

- 1) definire un riferimento lentamente variabile per la velocità angolare del motore (giri motore).
- 2) Agire sull'attuatore della frizione per fare in modo che i giri motore inseguano il riferimento.
- 3) L'inseguimento del riferimento (che varia lentamente) assicura la condizione voluta:

$$C_1 \simeq \tau_{13}$$

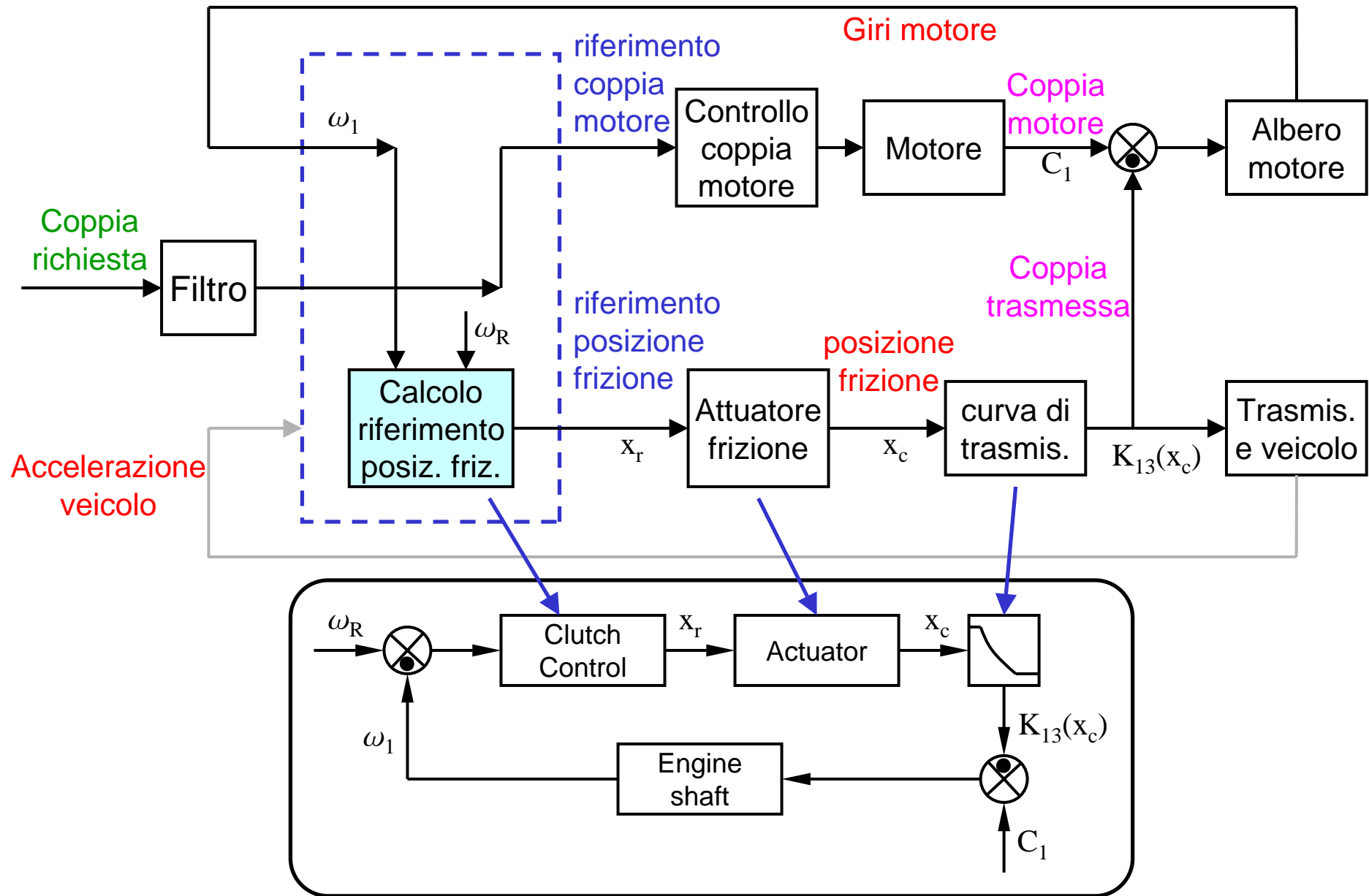
## Schema di controllo della frizione:

- 1) se i giri motore superano il riferimento la frizione si chiude e viceversa;
- 2) La coppia motore rappresenta un “disturbo” che il controllo della frizione deve compensare per assicurare l’inseguimento.
- 3) L’obiettivo di controllo della coppia trasmessa si ottiene in modo indiretto controllando i giri del motore.



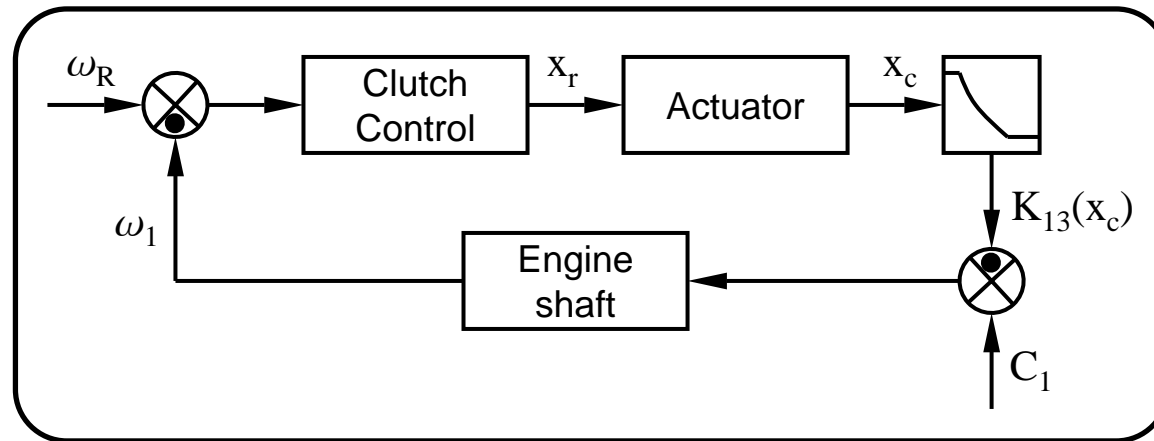
$$J_1 \dot{\omega}_1 = C_1 - k_{13}(x_c) \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_3) = C_1 - \tau_{13}$$

# Controllo della Frizione in Partenza (caso 1)



## Vantaggi della strategia di controllo:

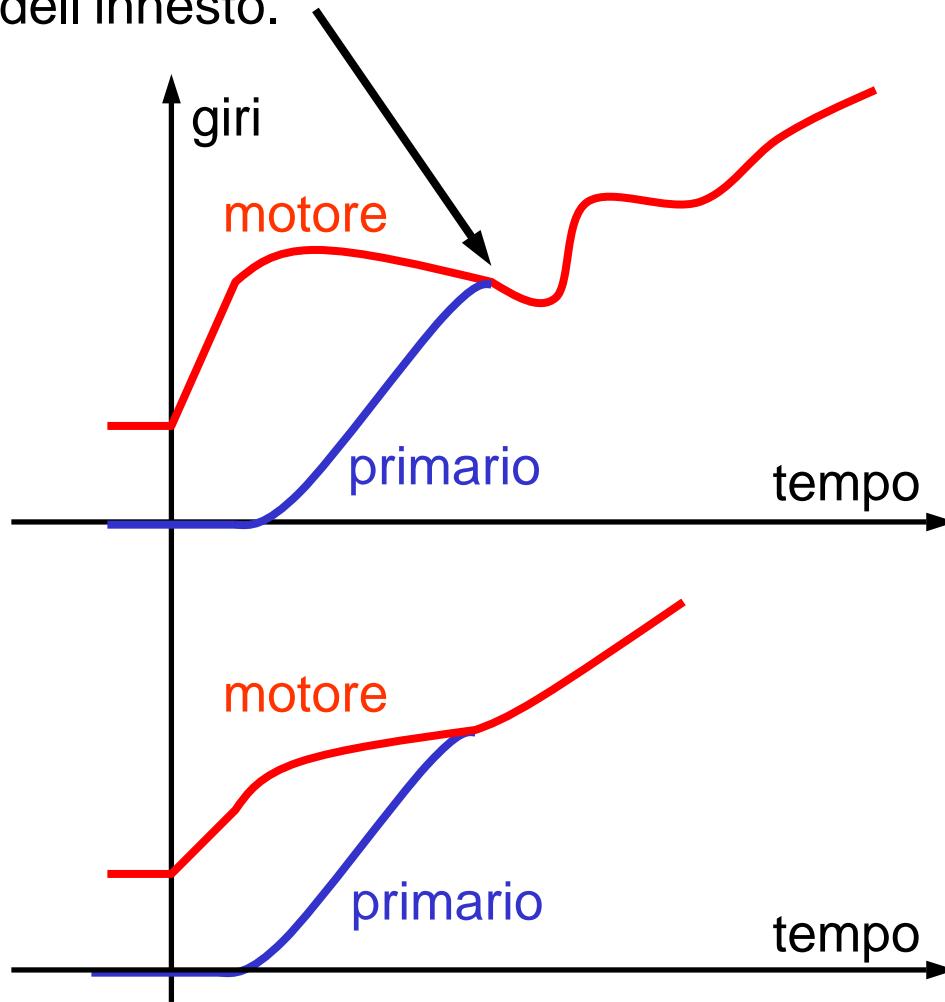
- 1) è semplice;
- 2) Evita automaticamente il fuori giri o lo spegnimento del motore.
- 3) Il riferimento per i giri del motore è una variabile di progetto che può essere utilizzata per creare diversi tipi di partenze (confortevole, veloce, sportiva,...).
- 4) Il disinnesto della frizione in caso di arresto avviene in modo automatico.



$$J_1 \dot{\omega}_1 = C_1 - k_{13}(x_c) \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_3) = C_1 - \tau_{13}$$

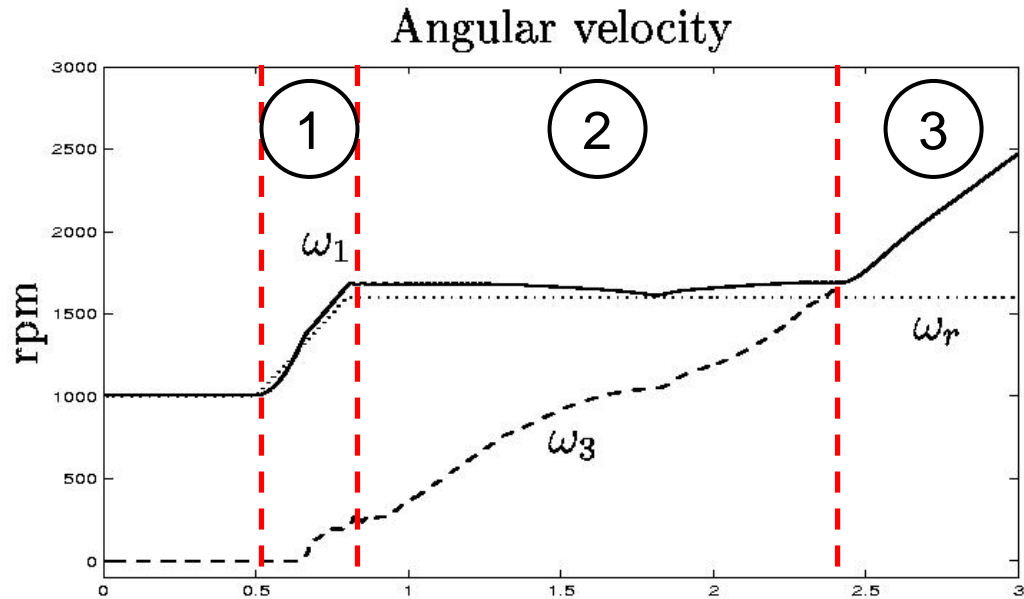
## Controllo della Frizione in Partenza (caso 1)

Per ottenere un innesto della frizione senza innescare oscillazioni sulla trasmissione è necessario che le accelerazioni angolari dell'albero motore e del primario del cambio siano uguali al momento dell'innesto.



Affinchè avvenga l'innesto le velocità dei due alberi devono convergere quindi è inevitabile l'innescò di oscillazioni sulla trasmissione.

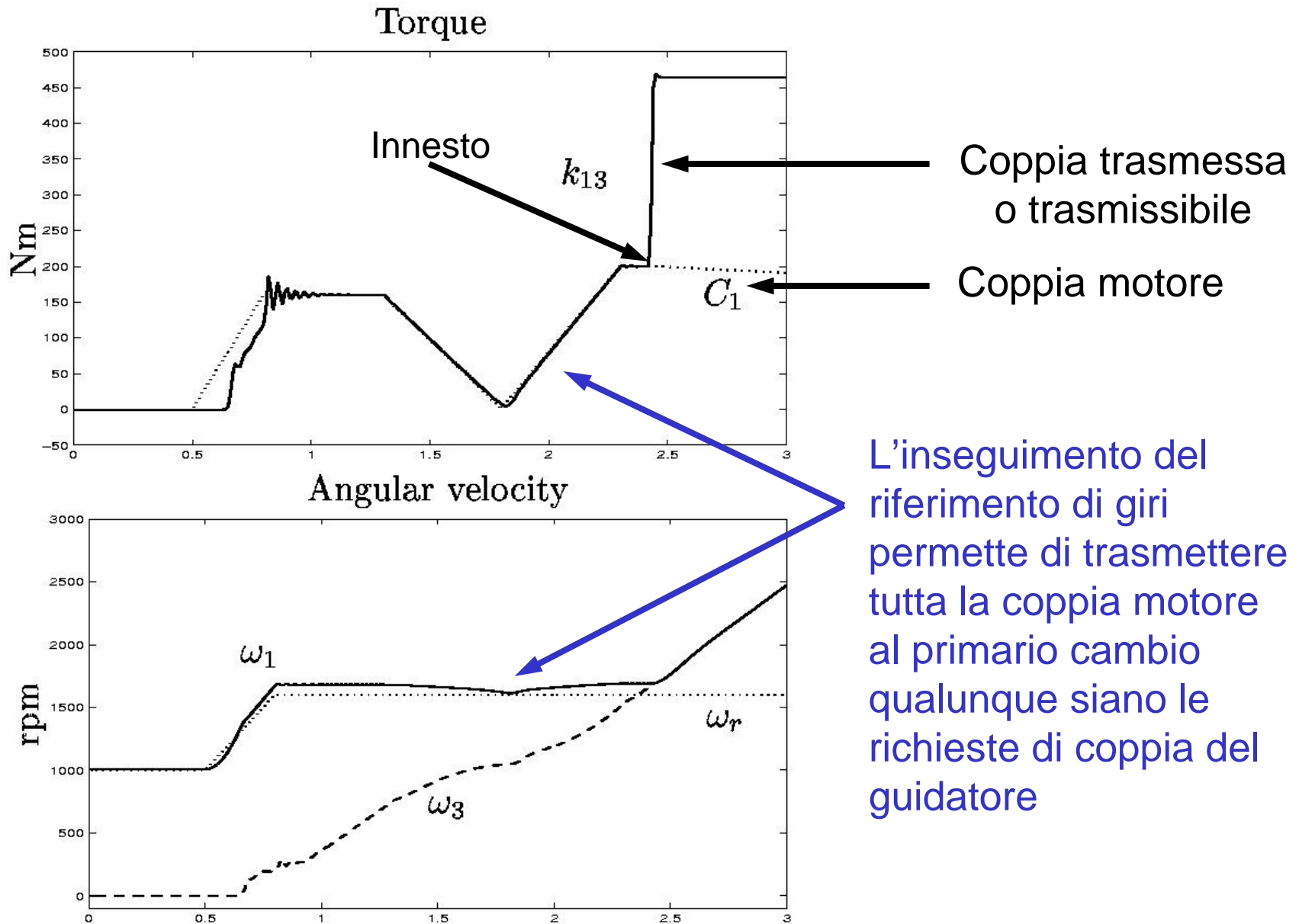
Per mantenere limitata l'ampiezza delle oscillazioni si può intervenire sulla definizione del riferimento di giri per l'albero motore.



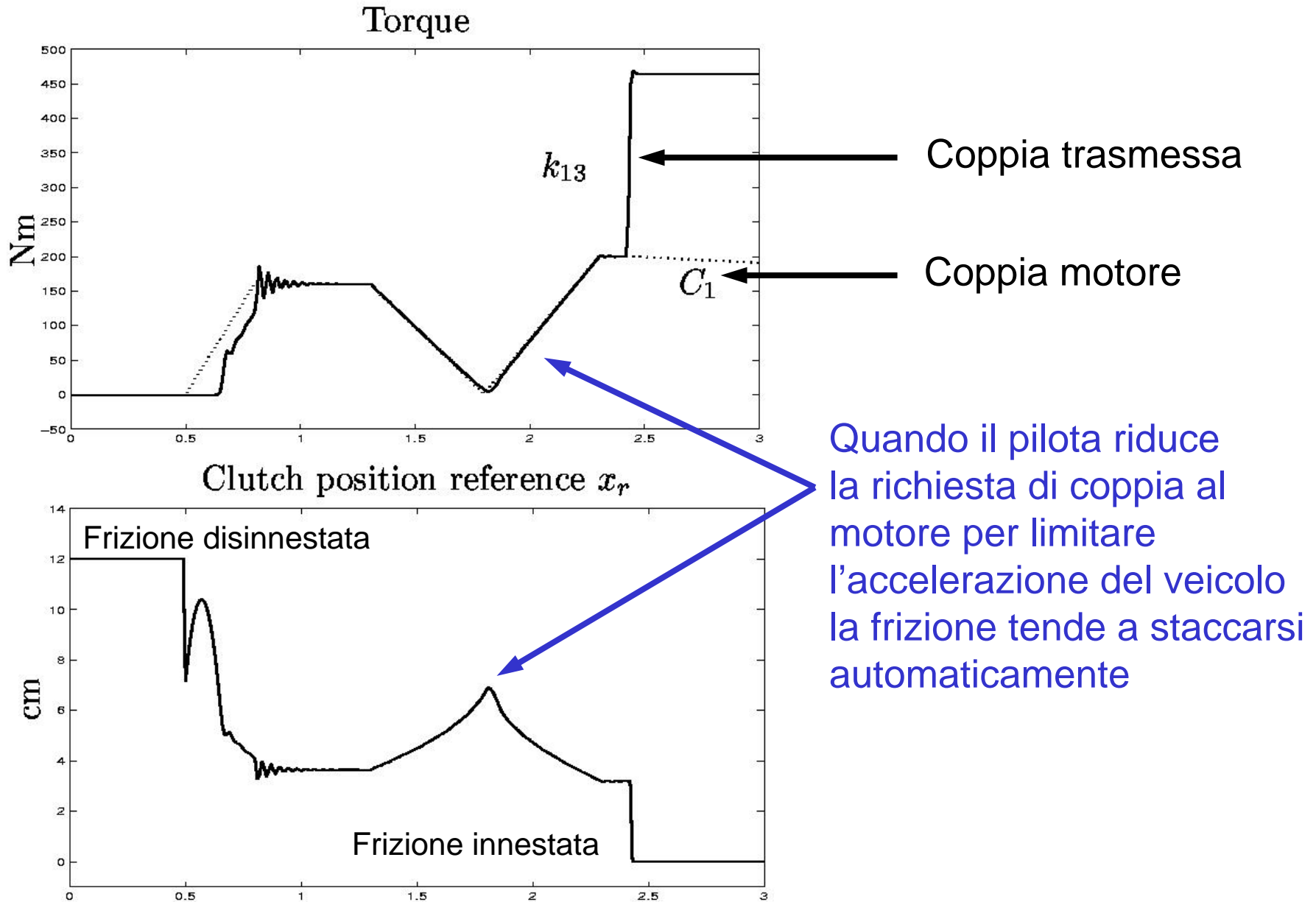
## Fasi della strategia di controllo:

- 1) Il pilota preme il pedale dell'acceleratore e la partenza inizia; i giri motore salgono intanto che la frizione raggiunge il PIS; si decide il tipo di partenza voluta dal pilota.
- 2) Fase di controllo giri: la coppia trasmessa dalla frizione accelera il veicolo.
- 3) I giri motore e cambio diventano uguali e la frizione viene innestata completamente.

# Controllo della Frizione in Partenza (caso 1): Simulazioni

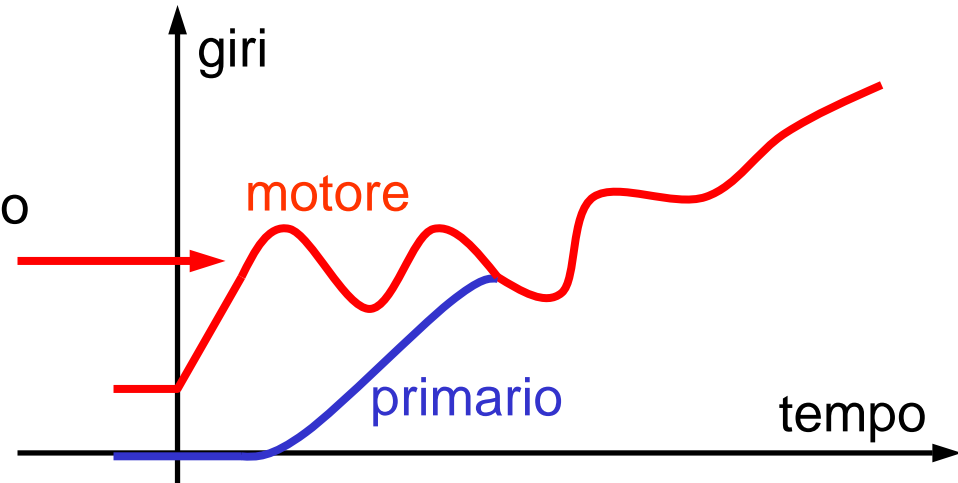


# Controllo della Frizione in Partenza (caso 1): Simulazioni



## Controllo della Frizione in Partenza (caso 2)

Se il controllo di posizione è lento, il sistema di controllo della frizione induce delle oscillazioni sui giri motore



Quando il controllo della coppia sul motore è molto più veloce del controllo di posizione della frizione si può “invertire” la strategia di controllo:

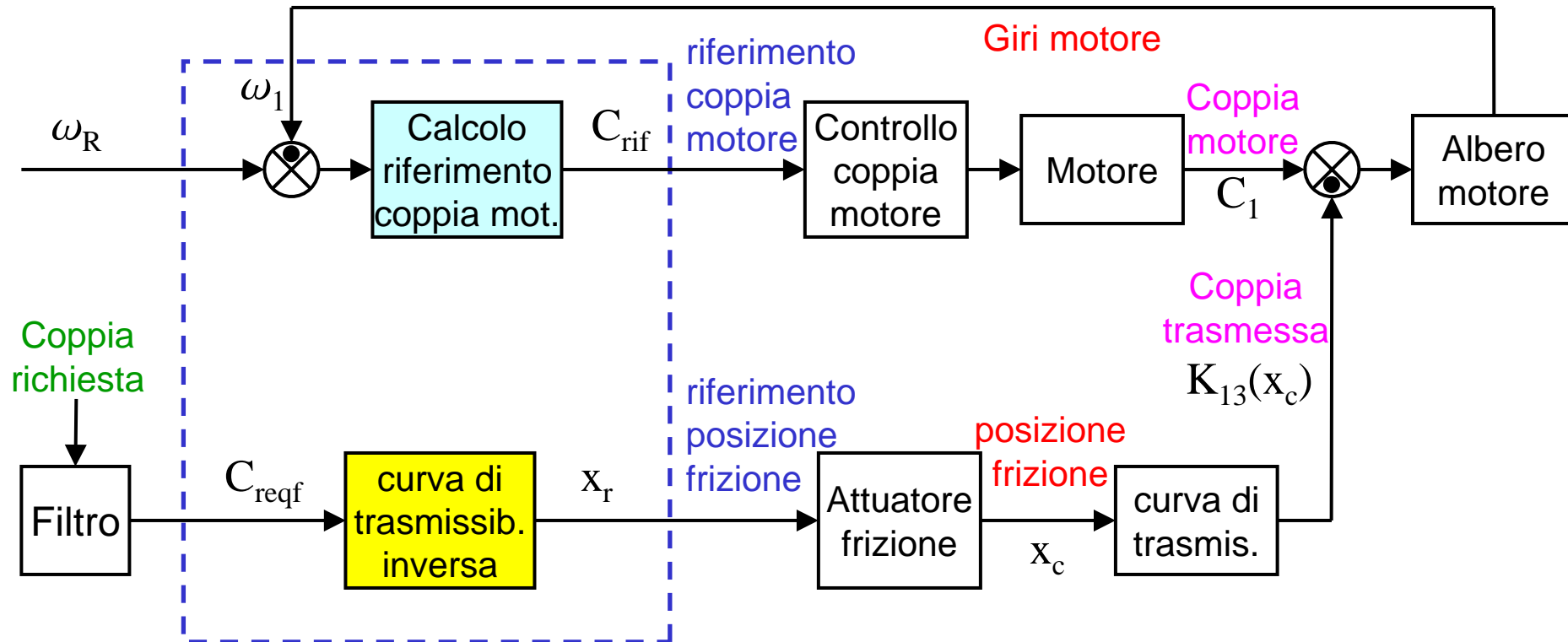
- 1) il controllo motore si occupa di inseguire il riferimento giri;
- 2) il pedale dell'acceleratore (lentamente variabile) fornisce il riferimento di posizione per la frizione.

In questo modo il pedale dell'acceleratore diventa una sorta di pedale della frizione. La strategia risulta in questo caso più complessa per evitare lo spegnimento del motore in partenza.

Una strategia di controllo motore-frizione combinata permette di ottenere le prestazioni migliori.

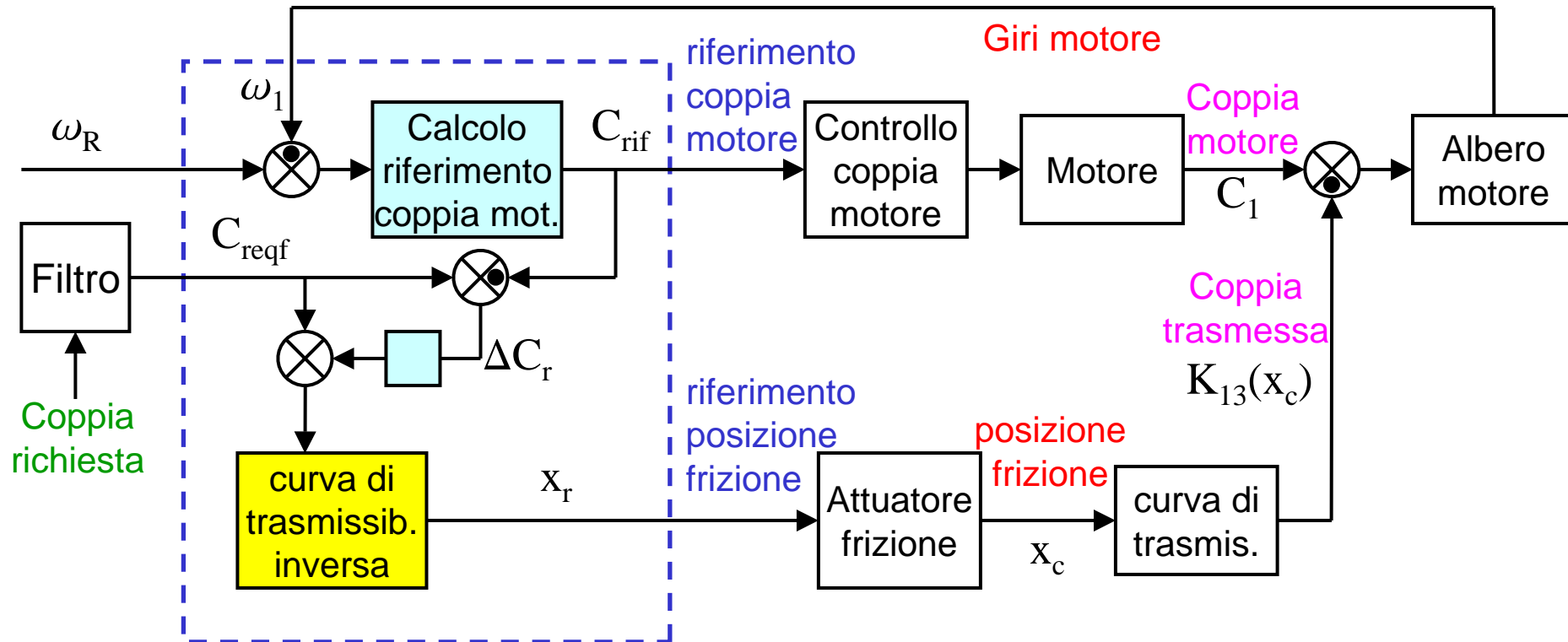
## Controllo della Frizione in Partenza (caso 2)

- il pedale dell'acceleratore (filtrato) fornisce tramite la curva di trasmissibilità stimata della frizione il riferimento di posizione  $x_r$  per l'attuatore frizione.
- il controllo motore si occupa di inseguire il riferimento giri al variare della posizione della frizione.



# Controllo della Frizione in Partenza (caso 3 esempio)

- il controllo motore si usa principalmente per controllare i giri motore.
- il controllo frizione è principalmente in catena aperta sulla base della curva di trasmissibilità stimata della frizione.
- il riferimento di posizione della frizione viene corretto sulla base della differenza  $\Delta C_r$  fra la coppia (filtrata) richiesta dal pilota  $C_{reqf}$  e la coppia richiesta al motore  $C_{rif}$  per inseguire il riferimento di giri in modo da compensare gli errori di stima.

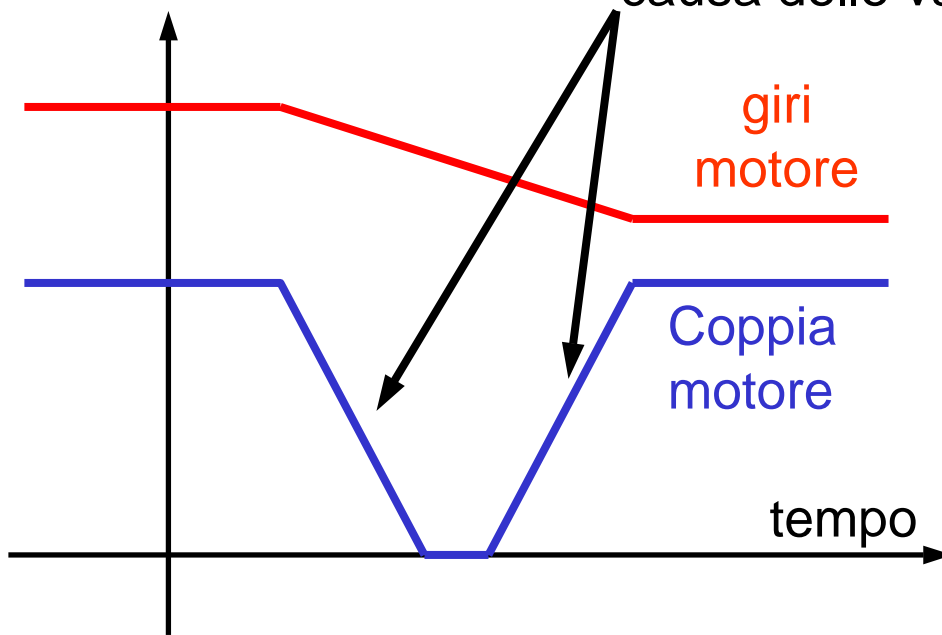


# Controllo della Frizione nei Cambi Marcia (1)

## Strategia di controllo in catena chiusa:

La strategia di controllo della frizione in partenza si può facilmente adattare ai cambi di marcia definendo un opportuno riferimento sia per i giri che per la coppia motore.

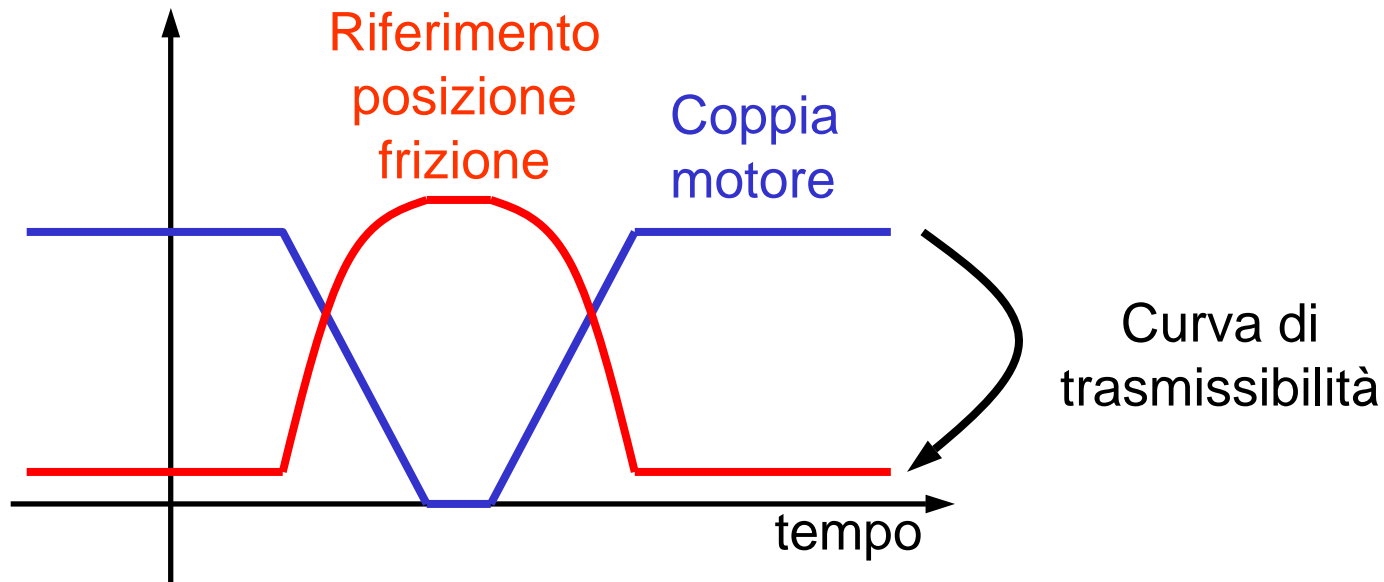
Per mantenere l'inseguimento del riferimento di giri motore, la strategia di controllo della frizione è costretta a disinnestare e a innestare la frizione a causa delle variazioni di coppia del motore.



### Strategia di controllo in catena aperta:

tramite la curva di trasmissibilità il riferimento di coppia motore fornisce anche il riferimento di posizione per la frizione.

Strategia molto semplice, ma è necessario conoscere bene la curva di trasmissibilità della frizione.



### Cambio marcia senza disinnesto della frizione:

Quando il controllo motore è molto più veloce del controllo della frizione, è possibile cambiare marcia agendo solo sulla coppia motore.

- 1) “Disinnesto”: si riduce la coppia motore, non appena si stima una coppia trasmessa nulla, si sfilata la marcia.
- 2) “Sincronizzazione”: tramite il controllo motore si portano i giri del primario al valore richiesto dalla nuova marcia. Il motore funziona da sincronizzatore.
- 3) “Innesto”: appena i giri del primario raggiungono il valore richiesto per la nuova marcia, si inserisce la marcia.

È necessario stimare molto bene la condizione di coppia trasmessa nulla per evitare oscillazioni della driveline al momento del disinnesto.