



AIMETA

Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata

AIMETA'05

XVII Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata
17th AIMETA Congress of Theoretical and Applied Mechanics

Firenze, 11 - 15 Settembre 2005

Università di Firenze

Progetto preliminare di trasmissioni CVT con due vie in parallelo

Alberto Beccari

Dipartimento di Meccanica, Università di Palermo, Italia

E-mail: beccari@dima.unipa.it

Marco Cammalleri

Dipartimento di Meccanica, Università di Palermo, Italia

E-mail: cammalleri@dima.unipa.it

Parole chiave: CVT, doppia via, trasmissioni meccaniche.

SOMMARIO

In questo lavoro si mostra come il funzionamento di una trasmissione di potenza meccanica attraverso due vie in parallelo, di cui una dotata di variatore di velocità angolare, dipenda direttamente, piuttosto che dai parametri costruttivi della trasmissione medesima, da altre grandezze, qui definite aperture A , A_v , A_i , rappresentative rispettivamente:

- del campo di variazione del rapporto di trasmissione complessivo della trasmissione CVT che si vuole realizzare;
- del campo di variazione del rapporto di trasmissione del variatore che si ha a disposizione per realizzarla;
- del campo di variazione della velocità angolare dell'albero di ingresso del variatore.

Per data terna di valori A , A_v , A_i risulta cinematicamente indifferente il collegamento scelto fra il portatreno, il solare e la corona dei rotismi epicicloidali ai vari rami della trasmissione e se questi collegamenti siano effettuati direttamente con giunti o mediante riduttori a rapporto fisso. Possono cioè realizzarsi molteplici soluzioni costruttivamente differenti ma cinematicamente affatto equivalenti e soprattutto "viste" dal variatore nel medesimo modo. Si potrà scegliere dunque quella di più facile realizzazione.

1. INTRODUZIONE

Trasmettere potenza meccanica con possibilità di variare con continuità il rapporto di trasmissione fra albero primario e secondario è una tematica particolarmente interessante, soprattutto nel campo "automotive".

Per superare le limitazioni poste dai variatori meccanici, in termini di massima potenza trasmissibile o di possibile escursione del rapporto di trasmissione, è stato proposto e realizzato da diversi autori il concetto della trasmissione di potenza in due vie in parallelo: una a rapporto variabile con continuità e l'altra a rapporto fisso. I due rami confluiscono in un rotismo epicicloidale da un lato, mentre dall'altro o sono collegati direttamente o mediante un secondo rotismo epicicloidale [1] [3] [4].

Tuttavia i modelli matematici finora proposti (vedi per es. [5][7][9][11]), impiegati anche per analisi sistematiche [8], risultano indicati più per l'analisi che per il progetto, poiché esprimono le potenze transitanti nei vari rami della trasmissione, inclusa quella nel variatore, in funzione dello specifico schema adottato e dei parametri costruttivi degli elementi stessi costituenti la trasmissione, cioè dei rapporti di trasmissione dei riduttori a rapporto fisso e dei rapporti caratteristici dei rotismi epicicloidali.

Manca quindi in letteratura una trattazione di carattere generale che, una volta scelto il campo di variazione del rapporto di trasmissione che si vuole realizzare e quello disponibile del variatore di partenza, possa anticipare, indipendentemente dallo schema, il guadagno conseguibile, in termini di minor potenza nel variatore, rispetto ad una trasmissione semplice (o viceversa). Questo è l'oggetto di studio del lavoro presentato.

2. POTENZA NEL VARIATORE E VARIABILI INDIPENDENTI CHE LA CONDIZIONANO.

Nella fase preliminare della progettazione di una trasmissione CVT a due vie il problema si pone nel modo seguente: realizzare una trasmissione dalla quale ci si attende un assegnato campo continuo di variazione del rapporto di trasmissione da conseguirsi con un variatore assegnato, cercando nel contempo di limitare la potenza transitante nel variatore stesso.

Affinché la potenza proveniente da un albero primario possa pervenire ad un albero di uscita, dopo essersi suddivisa nei due rami in parallelo, di cui uno a rapporto di trasmissione variabile, è necessaria la presenza di almeno un rotismo epicicloidale R.E. Come è noto, in un rotismo epicicloidale a tre alberi (portatreno p , corona c e solare s) la velocità di un albero risulta una combinazione lineare delle velocità degli altri due, secondo la

$$y = \frac{n_s - n_p}{n_c - n_p} \quad (1)$$

dove y è il rapporto di trasmissione del rotismo reso ordinario ed n_s ; n_p ; n_c le velocità dei tre alberi del rotismo. Si ha quindi un sistema a due gradi di libertà (gdl).

Se si considera un sistema meccanico a due rotismi epicicloidali e si collegano tra loro, direttamente o mediante un riduttore, due coppie qualunque dei sei alberi, si ottiene ancora un sistema a due gdl in cui, in generale, la velocità angolare di ognuno dei sei alberi è esprimibile come combinazione lineare delle velocità di due qualunque di questi sei alberi. Se si definiscono n_{IN} ed n_{OUT} le velocità degli alberi che assumeranno rispettivamente la funzione di albero di ingresso ed uscita per l'intera trasmissione si avrà:

$$n_j = a_j n_{IN} + b_j n_{OUT} \quad (2)$$

con $j=1,2,\dots,6$ ed a_j e b_j costanti numeriche dipendenti unicamente dall'effettivo schema di collegamento realizzato. Ovviamente, di volta in volta, due delle velocità n_j coincideranno rispettivamente con n_{IN} ed n_{OUT} .

Definiti inoltre

$$t = \frac{n_{OUT}}{n_{IN}} \quad \text{rapporto di trasmissione complessivo} \quad (3)$$

$$t_j = \frac{n_j}{n_{IN}} \quad \text{velocità adimensionale dei vari alberi} \quad (4)$$

si potrà scrivere anche

$$t_j = a_j + b_j t \quad (5)$$

Affinché il sistema ad due rotismi epicicloidali così costituito diventi una trasmissione CVT ad un solo grado di libertà occorre realizzare un ulteriore collegamento tra due qualunque di questi sei alberi mediante un variatore di velocità. Questo implica che le velocità angolari di ingresso n_j

ed uscita n_o del variatore saranno rispettivamente uguali a due delle n_j e quindi esprimibili come combinazione lineare di n_{IN} ed n_{OUT}

$$n_i/n_{IN} = \mathbf{t}_i = a_i + b_i \mathbf{t} \quad (6)$$

$$n_o/n_{IN} = \mathbf{t}_o = a_o + b_o \mathbf{t} \quad (7)$$

con le coppie di costanti (a_o, b_o) ed (a_i, b_i) coincidenti, di volta in volta, con due diverse coppie di (a_j, b_j) .

Pertanto il rapporto di trasmissione del solo variatore sarà esprimibile come:

$$\mathbf{t}_v = \frac{n_o}{n_i} = \frac{n_o/n_{IN}}{n_i/n_{IN}} = \frac{\mathbf{t}_o}{\mathbf{t}_i} = \frac{a_o + b_o \mathbf{t}}{a_i + b_i \mathbf{t}} \quad (8)$$

Indicando con \mathbf{t}_m ed \mathbf{t}_M i pedici che applicati ad una variabile indicano il valore che detta variabile assume quando il rapporto di trasmissione \mathbf{t} dell'intero impianto è rispettivamente minimo e massimo si definiscono aperture A , A_v ed A_i i rapporti:

$$A = \frac{\mathbf{t}_M}{\mathbf{t}_m} \quad (9); \quad A_v = \frac{\mathbf{t}_{vM}}{\mathbf{t}_{vm}} \quad (10); \quad A_i = \frac{\mathbf{t}_{iM}}{\mathbf{t}_{im}} \quad (11);$$

La (6) scritta per $\mathbf{t} = \mathbf{t}_M$ e $\mathbf{t} = \mathbf{t}_m$, consente di ottenere:

$$\frac{\mathbf{t}_{iM}}{\mathbf{t}_M} - \frac{\mathbf{t}_{im}}{\mathbf{t}_m} = a_i \left(\frac{1}{\mathbf{t}_M} - \frac{1}{\mathbf{t}_m} \right) \quad (12)$$

da cui

$$a_i = \frac{\mathbf{t}_M \mathbf{t}_{im} - \mathbf{t}_{iM} \mathbf{t}_m}{\mathbf{t}_M - \mathbf{t}_m} = \mathbf{t}_{im} \frac{A - A_i}{A - 1} \quad (13)$$

e

$$\mathbf{t}_{iM} - \mathbf{t}_{im} = b_i (\mathbf{t}_M - \mathbf{t}_m) \quad (14)$$

da cui:

$$b_i = \frac{\mathbf{t}_{iM} - \mathbf{t}_{im}}{\mathbf{t}_M - \mathbf{t}_m} = \frac{\mathbf{t}_{im}}{\mathbf{t}_m} \frac{A_i - 1}{A - 1} \quad (15)$$

Analogamente dalla (7) si ha:

$$a_o = \frac{\mathbf{t}_M \mathbf{t}_{om} - \mathbf{t}_{oM} \mathbf{t}_m}{\mathbf{t}_M - \mathbf{t}_m} = \mathbf{t}_{om} \frac{A - A_o}{A - 1} = \mathbf{t}_{im} \mathbf{t}_{vm} \frac{A - A_i A_v}{A - 1} \quad (16)$$

$$b_o = \frac{\mathbf{t}_{oM} - \mathbf{t}_{om}}{\mathbf{t}_M - \mathbf{t}_m} = \frac{\mathbf{t}_{om}}{\mathbf{t}_m} \frac{A_o - 1}{A - 1} = \frac{\mathbf{t}_{vm} \mathbf{t}_{im}}{\mathbf{t}_m} \frac{A_i A_v - 1}{A - 1} \quad (17)$$

Definito guadagno cinematico il rapporto $(d\mathbf{t}/\mathbf{t})/(d\mathbf{t}_v/\mathbf{t}_v)$ e guadagno di potenza il rapporto tra la potenza entrante nella trasmissione P_{totale} e quella transitante nel variatore $P_{variatore}$, è stato

mostrato in [12] mediante il principio dei lavori virtuali che, per qualunque schema, il prodotto di questi due guadagni è uguale ad uno, ossia:

$$P_v = \frac{P_{\text{variatore}}}{P_{\text{totale}}} = \frac{dt/t}{dt_v/t_v} \quad (18)$$

Dalla (8) può quindi scriversi:

$$\frac{dt_v}{t_v} = \frac{dt_o}{t_o} - \frac{dt_i}{t_i} = \frac{b_o dt}{a_o + b_o t} - \frac{b_i dt}{a_i + b_i t} = \frac{dt}{t} \frac{t(a_i b_o - a_o b_i)}{(a_o + b_o t)(a_i + b_i t)}$$

che sostituita nella (18) dà

$$P_v = \frac{dt/t}{dt_v/t_v} = \frac{\left(1 + \frac{b_o t}{a_o}\right) \left(1 + \frac{b_i t}{a_i}\right)}{t \left(\frac{b_o - b_i}{a_o - a_i}\right)} \quad (19)$$

Sostituendo le (13) (15) (16) (17) nella (19) si ottiene infine:

$$P_v = \frac{\left[1 + \frac{t}{t_m} \frac{A_i A_v - 1}{A - A_i A_v}\right] \left[1 + \frac{t}{t_m} \frac{A_i - 1}{A - A_i}\right]}{\frac{t}{t_m} \left[\frac{A_i A_v - 1}{A - A_i A_v} - \frac{A_i - 1}{A - A_i}\right]} \Rightarrow$$

$$P_v = \frac{[(A - A_i A_v) + t(A_i A_v - 1)][(A - A_i) + t(A_i - 1)]}{t A_i (A - 1)(A_v - 1)} \quad (20)$$

in cui si è indicato

$$t = \frac{t}{t_m} \quad (t = I \leftrightarrow A) \quad (21)$$

Si conclude dunque che, assegnata l'apertura complessiva A e quella A_v del variatore, la frazione di potenza trasmessa dal variatore P_v è funzione del rapporto di trasmissione t dell'intero meccanismo, rapportato al proprio valore minimo, e della apertura A_i , definita come il rapporto tra la velocità angolare massima e minima dell'albero primario del variatore. Detta potenza non dipende quindi direttamente dallo schema prescelto né tanto meno dai parametri costruttivi degli elementi costituenti la trasmissione stessa, se non nella misura in cui questi possano variare l'apertura A_i dell'albero di ingresso nel variatore, così come verrà descritto nel paragrafo seguente.

Se si esplicita $t = t/t_v$ dalla (8):

$$t = \frac{a_o - a_i t_v}{b_i t_v - b_o} \quad (22)$$

e si sostituisce nella (19), con procedimento del tutto analogo si perviene a

$$P_v = \frac{t_v A_i (A-1)(A_v-1)}{[t_v (A_i-1) - (A_i A_v - 1)][(A - A_i A_v) - t_v (A - A_i)]} \quad (23)$$

con

$$t_v = \frac{\mathbf{t}_v}{\mathbf{t}_{vm}} \quad (t_v = I \leftrightarrow A_v) \quad (24)$$

Infine dalla (22) e dalla (6), effettuando le dovute sostituzioni, si ricavano rispettivamente i legami funzionali $\mathbf{t} = \mathbf{t}(t_v)$ e $t = t(t_v)$ nonché $\mathbf{t}_i = \mathbf{t}_i(\mathbf{t})$ e $t_i = t_i(t)$ per i quali valgono le medesime considerazioni fatte per la potenza P_v .

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_m \frac{\mathbf{t}_{vm} (A - A_i A_v) + \mathbf{t}_v (A_i - A)}{\mathbf{t}_{vm} (1 - A_i A_v) + \mathbf{t}_v (A_i - 1)} \quad t = \frac{(A - A_i A_v) + t_v (A_i - A)}{(1 - A_i A_v) + t_v (A_i - 1)} \quad (25)$$

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{t}_{im} \frac{(A - A_i)}{(A-1)} + \frac{\mathbf{t}_{im} (A_i - 1)}{\mathbf{t}_m (A-1)} \mathbf{t} \quad t_i = \frac{(A - A_i)}{(A-1)} + \frac{(A_i - 1)}{(A-1)} t \quad (26)$$

3. MECCANISMI PER LA TRASMISSIONE IN PARALLELO

3.1. Caratterizzazione dei rotismi epicicloidali

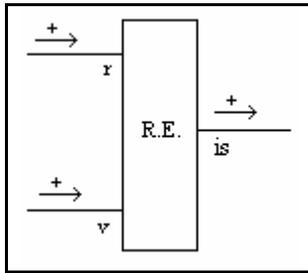


Figura 1

Si consideri il generico schema di rotismo epicicloidale di Figura 1.

Per l'equilibrio delle coppie applicate:

$$C_{is} = C_r + C_v \quad (27)$$

per la conservazione della potenza nel funzionamento ideale:

$$C_{is} n_{is} = C_r n_r + C_v n_v \quad (28)$$

da cui

$$\mathbf{g} = \frac{C_v}{C_{is}} = \frac{n_{is} - n_r}{n_v - n_r} \quad (29)$$

Al variare delle velocità angolari degli alberi confluenti nel R.E. la quantità \mathbf{g} (coppia adimensionata sull'albero v) risulta una costante che dipende unicamente da rapporto caratteristico \mathbf{y} del R.E. e dai vari modi di collegare gli alberi is,r,v agli elementi caratteristici del R.E., portatreno p, corona c e solare s (vedi Tabella 1). Qualora la connessione degli alberi is,r,v al portatreno p, alla corona c e al solare s avvenisse non direttamente ma mediante riduttori a rapporto fisso, la (29) rimarrebbe comunque valida, mentre a cambiare sarebbe solo la tabella di corrispondenza tra \mathbf{g} e \mathbf{y} che dipenderebbe ora anche dai rapporti di trasmissione dei riduttori fissi.

Ciascun rotismo epicicloidale R.E. (o meglio ciascun sistema meccanico a tre alberi e due gradi di libertà) può quindi essere caratterizzato da un preciso valore costante \mathbf{g} che lo qualifica e che impone un legame funzionale lineare fra le velocità angolari dei tre alberi in esso confluenti dato dalla (29). Pertanto, per semplicità, nel prosieguo della trattazione le connessioni tra i vari alberi della trasmissione con gli alberi dei R.E. verranno considerate dirette.

3.2. Trasmissioni con due rotismi epicicloidali (BiR.E.)

Si consideri ora il sistema a due R.E. di Figura 2 in cui, senza limitare la generalità della trattazione, si è collegato il primo rotismo, R.E.1, all'albero di ingresso IN ed il secondo, R.E.2, all'albero di uscita OUT della trasmissione.

Definiti per i due rotismi

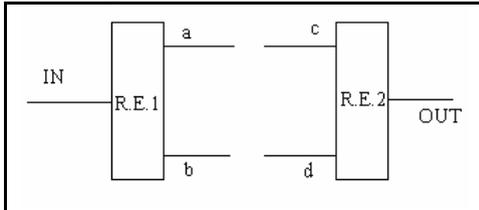


Figura 2

$$g_1 = \frac{C_b}{C_{IN}} \quad (30)$$

$$g_2 = \frac{C_d}{C_{OUT}} \quad (31)$$

le equazioni (3), (4) e (29), consentono di scrivere

$$1 = (1 - g_1) \cdot t_a + g_1 \cdot t_b \quad (32)$$

$$t = (1 - g_2) \cdot t_c + g_2 \cdot t_d \quad (33)$$

legami funzionali lineari tra le velocità angolari adimensionali degli alberi confluenti nei R.E.

Affinché le quattro velocità adimensionali t_a ; t_b ; t_c ; t_d risultino univocamente determinate in

funzione della variabile indipendente t (vedi eq.(5)) bisogna imporre due condizioni indipendenti il che si ottiene, come detto al paragrafo precedente, collegando fra loro due coppie qualunque dei sei alberi: "IN, a; b; c; d; OUT". In realtà, ai fini della realizzazione di un meccanismo per la trasmissione CVT in parallelo, alcuni collegamenti risultano inopportuni e quindi da non prendere in considerazione. In particolare non ha senso collegare tra loro gli alberi di ingresso "IN" ed uscita "OUT" (si imporrebbe tra essi un rapporto di velocità costante) così come due alberi di un medesimo rotismo epicicloidale (sarebbe equivalente ad un rotismo ordinario). Per quanto detto e tenendo conto della "simmetria" della Figura 2, i casi interessanti si riducono a quattro che prevedono accoppiamenti degli alberi "interni" ai due R.E. "a; b; c; d":

Comb.	
p → is c → r s → v	$y_1 = \frac{g-1}{g}$
p → is c → v s → r	$y_2 = \frac{g}{g-1}$
p → r c → is s → v	$y_3 = \frac{1}{g}$
p → v c → is s → r	$y_4 = \frac{1}{1-g}$
p → r c → v s → is	$y_5 = g$
p → v c → r s → i	$y_6 = 1-g$

Tabella 1

- I nessun albero "libero": a collegato a c; b collegato a d
- II un solo albero "libero": a collegato a c; b collegato ad OUT; d libero
- III un solo albero "libero": b collegato a d; c collegato a IN; a libero
- IV due alberi "liberi": b collegato ad OUT ; c collegato ad IN, a e d liberi.

Affinché i quattro schemi a due rotismi epicicloidali così costituiti diventino una trasmissione CVT ad un solo grado di libertà occorre realizzare un ulteriore collegamento, in teoria tra due qualunque di questi sei alberi, mediante un variatore di velocità. In realtà anche in questo caso alcuni collegamenti risultano inopportuni. In particolare sono da evitare i collegamenti tra l'albero di ingresso "i" o di uscita "o" del variatore e quelli di ingresso "IN" ed uscita "OUT" della trasmissione, perché in tal modo l'apertura A_i , unico parametro in grado di influenzare l'andamento della potenza nel variatore, giusta la (20), non sarebbe più una variabile indipendente da A ed A_v .

Infatti definita apertura del generico albero "j" della trasmissione il rapporto n_{jM}/n_{jm} si ha la situazione di Tabella 2.

Albero	Apertura
IN	1
OUT	A
i	A_i
o	$A_i A_v$

Tabella 2

Collegare l'albero "i" all'albero "IN" imporrebbe $A_i=1$. Collegare "o" ad "IN", $A_i=1/A_v$. Collegare "i" ad "OUT" $A_i=A$. Infine collegare "o" ad "OUT" $A_i=A/A_v$. Inoltre questi quattro valori dell'apertura A_i sono ottenibili, come si vedrà al successivo paragrafo, con schemi ad un solo R.E. e poiché a parità di A_i la formula (20) mostra che nel variatore transiterebbe la medesima potenza, non avrebbe senso realizzare una trasmissione più

complessa con due R.E..

Con due R.E. è dunque interessante solamente collegare il variatore a due alberi "interni" al meccanismo non contemporaneamente collegati ad "IN" o ad "OUT". Nei quattro schemi, I II, III e IV si avrà quindi "i" collegato con "a" ed "o" con "d" (vedi Figure 3-6).

A questo punto è possibile ottenere per i quattro casi sia gli andamenti delle velocità angolari adimensionali t_a ; t_b ; t_c ; t_d degli alberi "interni" al meccanismo in funzione (lineare) di t , sia i valori delle costanti g e g_2 dei due R.E. in funzione delle aperture A, A_v ad A_i .

Mediante le (32) e (33), dopo diversi passaggi matematici si ottiene:

SCHEMA I

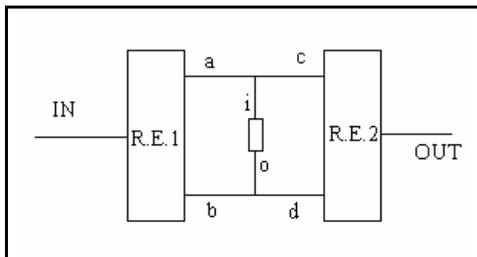


Figura 3

$$t_c = t_a = \frac{1}{g_2 - g_1} (g_2 - t \cdot g_1) \quad (34)$$

$$t_b = t_d = \frac{1}{g_2 - g_1} [t(1 - g_1) - (1 - g_2)] \quad (35)$$

$$g_1 = \frac{1}{t_{i_m} t_{v_m}} \frac{(1 - A_i)}{A_i (A_v - 1)} \quad (36)$$

$$g_2 = \frac{t_m}{t_{i_m} t_{v_m}} \frac{(A - A_i)}{A_i (A_v - 1)} \quad (37)$$

SCHEMA II

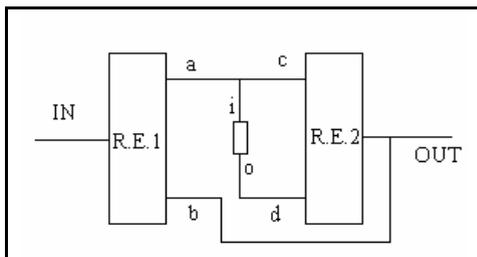


Figura 4

$$t_c = t_a = \frac{1}{1 - g_1} (1 - t \cdot g_1) \quad (38)$$

$$t_b = t; \quad t_d = \frac{1}{g_2 (1 - g_1)} [t(1 - g_2 g_2) - (1 - g_2)] \quad (39)$$

$$g_1 = \frac{1}{1 - \frac{t_m}{t_{i_m}} \frac{(A - 1)}{(A_i - 1)}} \quad (40)$$

$$g_2 = \frac{t_m}{t_{i_m} t_{v_m}} \frac{(A - A_i)}{A_i (A_v - 1)} \quad \text{uguale allo SCHEMA I}$$

SCHEMA III

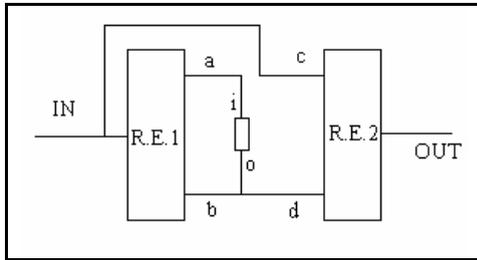


Figura 5

$$t_a = \frac{1}{g_2(1-g_1)} [(g_2 + g_1 - g_1 g_2) - t g_1] \quad (41)$$

$$t_c = 1; \quad t_d = t_b = \frac{1}{g_2} [t(1-g_2)] \quad (42)$$

$$g_1 = \frac{1}{t_{i_m} t_{v_m}} \frac{(1-A_i)}{A_i(A_v-1)} \quad \text{uguale allo SCHEMA I}$$

$$g_2 = \frac{t_m}{t_{i_m} t_{v_m}} \frac{(A-1)}{(A_i A_v - 1)} \quad (43)$$

SCHEMA IV

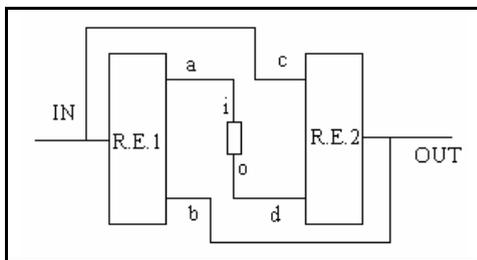


Figura 6

$$t_a = \frac{1}{1-g_1} (1-t \cdot g_1); \quad t_b = t \quad (44)$$

$$t_c = 1; \quad t_d = \frac{1}{g_2} [t - (1-g_2)] \quad (45)$$

$$g_1 = \frac{1}{1 - \frac{t_m}{t_{i_m}} \frac{(A-1)}{(A_i-1)}} \quad \text{uguale allo SCHEMA II}$$

$$g_2 = \frac{t_m}{t_{i_m} t_{v_m}} \frac{(A-1)}{(A_i A_v - 1)} \quad \text{uguale allo SCHEMA III}$$

Fissata l'apertura A_i , si possono ora dimensionare i rotismi epicicloidali, individuandone le costanti g_j e g e quindi secondo la Tabella 1 le costanti y_1 e y_2 . L'apertura A_i , essendo l'unico parametro a potere influire sull'andamento della potenza che il variatore deve trasmettere, può essere scelta in modo tale da limitarne il valore massimo o comunque, in modo da adeguare al meglio la potenza richiesta a quella che un variatore meccanico (o di altro tipo) è in grado di trasmettere, in funzione del proprio rapporto di trasmissione e della velocità angolare del proprio albero primario (vedi successivo paragrafo 4).

In conclusione preme evidenziare che cambiare schema (Figure 3-6) e, per dato schema, le connessioni dei tre alberi confluenti nei R.E. con solare - portatreno - corona Tabella 1 (da effettuare senza o con riduttori a rapporto fisso), serve unicamente a cambiare il progetto costruttivo dei rotismi epicicloidali (dei sottosistemi a tre alberi e due gdl) ma non il funzionamento del meccanismo nel suo complesso e in particolare del variatore, il quale sarà interessato sempre dalle stesse condizioni al contorno in termini di potenza trasmessa (vedi la (20)), velocità dei suoi alberi (vedi la (26)) e quindi coppia applicata.

In altri termini, scelti i valori "M" ed "m" di t , t_v , e t_i , (e quindi di A , A_v , ed A_i) possono realizzarsi $(6 \times 2)^2 \times 4 = 576$ meccanismi ¹ costruttivamente differenti ma cinematicamente affatto

¹ 6 è il numero di possibili collegamenti dei tre alberi confluenti in un R.E. con solare-portatreno-corona (vedi Tabella 1). Ciascuno di essi può essere diretto o mediante riduttore (x2). Infine i R.E. sono due (ele vazione al quadrato) e gli schemi sono quattro.

equivalenti e soprattutto “visti” dal variatore nel medesimo modo. Si potrà scegliere dunque quello di più facile realizzazione costruttiva.

3.3. Trasmissioni con un rotismo epicicloidale (Mono R.E.)

Nel caso in Figura 2 sia presente un solo rotismo epicicloidale, per il che basterà pensare R.E.1 o R.E.2 sostituito da un rotismo ordinario (analiticamente γ_1 e γ_2 alternativamente uguali a zero o ad uno) non è possibile evitare di far ruotare un albero del variatore “i” od “o” con una velocità angolare che non sia proporzionale a quella dell’albero di ingresso “IN” o di uscita “OUT” della trasmissione (vedi paragrafo 3.2), per cui ne risulta obbligata l’apertura $A_i = t_{im}/t_{im}$, secondo una delle seguenti alternative (vedi Figura 7). Dalle formule (20) e (23) della potenza richiesta in linea, si ha:

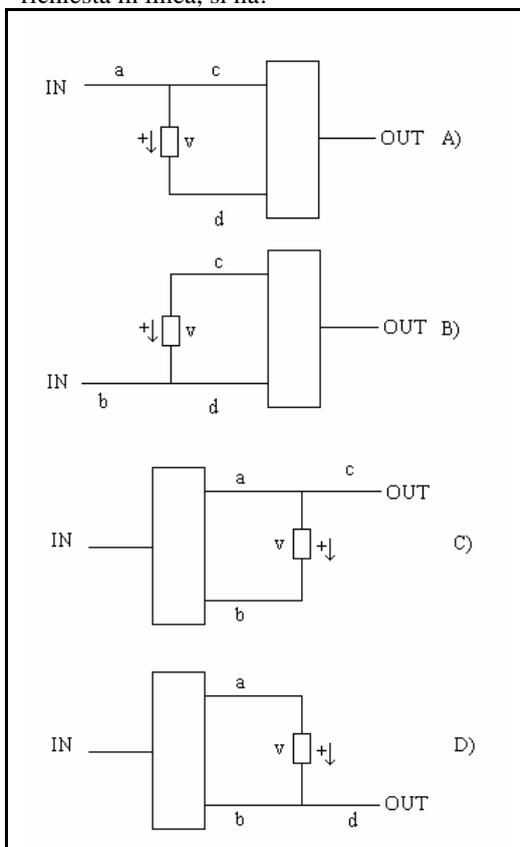


Figura 7

$$t \cdot \bar{t} = A \text{ (ovvero } t_v \cdot \bar{t}_v = A_v)$$

$$t \cdot \bar{t} = A \text{ ed } A \cdot \bar{A} = 1 \text{ (ovvero } t_v \cdot \bar{t}_v = A_v \text{ ed } A_v \cdot \bar{A}_v = 1)$$

A) solo rotismo R.E.2; $g_j=0$; albero $a=IN=c$; $A_i=1$.

$$P_v = 1 - \frac{A_v - A}{t(A_v - 1)} = \frac{1}{1 + \frac{A_v - A}{t_v(A-1)}} \quad (46)$$

B) solo rotismo R.E.2; $g_j=1$; albero $b=IN=d$; $A_i=1/A_v$:

$$P_v = -1 + \frac{AA_v - 1}{t(A_v - 1)} = -\frac{1}{1 + \frac{t_v(1 - AA_v)}{A_v(A-1)}} \quad (47)$$

C) solo rotismo R.E.1; $g_j=0$; albero $a=OUT=c$; $A_i=A$:

$$P_v = -1 + t \frac{AA_v - 1}{A(A_v - 1)} = \frac{1}{\frac{AA_v - 1}{t_v(A-1)} - 1} \quad (48)$$

D) solo rotismo R.E.1; $g_j=1$; albero $b=OUT=d$; $A_i=A/A_v$:

$$P_v = 1 - t \frac{A_v - A}{A(A_v - 1)} = \frac{1}{1 + \frac{t_v}{A_v} \frac{A_v - A}{A-1}} \quad (49)$$

Ne conseguono andamenti monotoni crescenti o decrescenti fra P_{vm} e P_{vM} , sostanzialmente identici, in modulo, operando le seguenti sostituzioni:

corrispondenza A) \Leftrightarrow D) e B) \Leftrightarrow C)

4. ADEGUAMENTO DELLA POTENZA RICHIESTA IN LINEA ALLA POTENZA TRASMISSIBILE DAL VARIATORE

Nel paragrafo 2 si è visto che, assegnata l'apertura complessiva A della trasmissione che si vuole progettare e quella A_v del variatore che si ha a disposizione, l'andamento della potenza che il variatore deve trasmettere P_v , così come l'andamento della velocità del suo albero di ingresso t_v , può essere influenzato unicamente dalla apertura A_i , e questo a prescindere dallo schema prescelto e dai parametri costruttivi degli elementi costituenti la trasmissione stessa.

Nel paragrafo 3.2 si è visto che con gli schemi *BiR.E.* l'apertura A_i può essere scelta effettivamente ad arbitrio mentre per gli schemi *MonoR.E.*, paragrafo 3.3, essa può essere scelta solamente tra quattro valori distinti.

La scelta di ricorrere alla tipologia di impianto *BiR.E.*, più complessa, dipenderà quindi unicamente da quanto bene gli A_i imposti dalla tipologia *MonoR.E.* riescano ad adeguare l'andamento di P_v richiesta dalla linea a quello che un variatore è effettivamente in grado di trasmettere. Infatti, in generale, i variatori di velocità hanno la capacità di trasmettere una potenza massima che è funzione sia della velocità angolare del proprio albero primario, oramai imposta (26), sia del proprio rapporto di trasmissione, anch'esso imposto (25).

La ricerca del valore ottimale dell'apertura A_i andrà condotta quindi, confrontando l'andamento della funzione $P_v = P_v(t_v)$ della potenza richiesta in linea (23) per assegnato valore di A_i , con l'andamento della potenza fornibile dal variatore impiegato, sempre in funzione di t_v : il giusto valore di A_i da scegliere sarà quello che rende il più possibile omologhi i due andamenti, consentendo così di rendere minima la dimensione del variatore.

In ogni caso la funzione della potenza P_v (20) applicata agli estremi del campo di variazione di t , ($t=I$; $t=A$), conduce ai valori:

$$P_{v_m} = \frac{A-1}{A_v-1} \frac{1}{A_i} \quad P_{v_M} = \frac{A_v}{A} A_i \frac{A-1}{A_v-1} \quad (50)$$

da cui si evince che mentre il rapporto P_{v_M}/P_{v_m} può essere influenzato dalla scelta di A_i , il prodotto delle medesime variabili $P_{v_M} \cdot P_{v_m}$ è invariante rispetto ad A_i .

Infine si desidera evidenziare che, come facilmente il lettore può ricavare con i classici metodi dell'analisi delle funzioni, la scelta $A_i = \sqrt{A/A_v}$, possibile ovviamente solo per gli schemi *BiR.E.*, è quella che rende minimo il valore massimo della potenza P_v che il variatore deve trasmettere in linea. Lo stesso valore di A_i inoltre, rende la funzione P_v (20) logaritmicamente simmetrica, nel senso che $P_v(t) = P_v(\bar{t})$ con $t \cdot \bar{t} = A$, rendendo di conseguenza uguali anche le due potenze P_{v_M} , P_{v_m} sopra richiamate (lo stesso vale per la $P_v(t_v) = P_v(\bar{t}_v)$ con $t_v \cdot \bar{t}_v = A_v$).

Se l'andamento della potenza fornibile dal variatore in funzione di t_v avesse la "simmetria" logaritmica evidenziata per la potenza (23) richiesta in linea, la scelta $A_i = \sqrt{A/A_v}$ sarebbe ottimale per ottenere le dimensioni minime del variatore. Un variatore a potenza costante, affatto virtuale, possiederebbe ovviamente tale caratteristica di simmetria, mentre un variatore a cinghia tra pulegge a diametro variabile per esempio, ancorché di costruzione simmetrica, non possiede invece tale proprietà.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro si è mostrato che, in esercizio ideale, il funzionamento di una qualunque trasmissione meccanica con due vie in parallelo, di cui una dotata di variatore di velocità angolare, non dipende direttamente dai parametri costruttivi degli elementi stessi costituenti la trasmissione,

cioè dai rapporti di trasmissione dei riduttori a rapporto fisso e dai rapporti caratteristici dei rotismi epicicloidali, ma da altre grandezze, qui definite aperture A , A_v , A_i , rappresentative rispettivamente:

- del campo di variazione del rapporto di trasmissione complessivo della trasmissione CVT che si vuole realizzare;
- del campo di variazione del rapporto di trasmissione del variatore che si ha a disposizione per realizzarla;
- del campo di variazione della velocità angolare dell'albero di ingresso del variatore.

Assegnate le aperture A ed A_v , è possibile intervenire sull'andamento della potenza del variatore P_v solamente mediante il parametro A_i . In particolare se di rotismi epicicloidali se ne prevedono due, allora A_i è effettivamente una variabile indipendente mentre se invece il rotismo epicicloidale previsto è uno solo, allora A_i dipende univocamente da A e A_v , e non è quindi più possibile intervenire. In ogni caso per data terna di valori A , A_v , A_i (con A_i arbitrario o imposto che sia) risulta indifferente il collegamento scelto fra il portatreno, il solare e la corona dei rotismi epicicloidali ai vari rami della trasmissione e se questi collegamenti siano effettuati direttamente con giunti o mediante riduttori a rapporto fisso.

Cambiare schema e, per dato schema, le connessioni con solare - portatreno - corona serve unicamente a cambiare il progetto costruttivo della trasmissione ma non il funzionamento del meccanismo nel suo complesso e in particolare del variatore, il quale sarà interessato sempre dalle stesse condizioni al contorno in termini di potenza trasmessa, velocità dei suoi alberi e quindi coppia applicata. In altri termini, scelti i valori di A , A_v , ed A_i possono realizzarsi numerosissime soluzioni costruttivamente differenti ma cinematicamente affatto equivalenti e soprattutto "viste" dal variatore nel medesimo modo. Si potrà scegliere dunque quella di più facile realizzazione costruttiva.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Andolina, M. and Beccari, A., (1996), "Continuous Variation Transmission in Automotive Application: Extension of the Working Range of Automotive Transmission to Start and Reverse Motion with Minimization of Variator Dimension", The JSAE Intern. Conf. CVT '96, Yokohama, Japan.
- [2] Beccari, A. and Sorge, F., (1986), "Trasmissione di Potenza con Variazione Continua del Rapporto di Trasmissione", ATA, Italy, v. 39.
- [3] Beccari, A. and Cammalleri, M., (2001) "Implicit Regulation for Automotive Variators", Proc. Instn Mech. Engrs, Part D- Journal of Automobile Engineering , D6, v. 215.
- [4] Beccari A., Cammalleri M., Sorge F., (2002), "Experimental Results for a Two-Mode Split-Way CVT". VDI Berichte 1709, pagg. 165-178.
- [5] Hong-Sen Y., Long-Chag H., (1994) "Maximum Mechanical efficiency of Infinitely Variable Transmissions ", Mechanism and Machine Theory, Vol. 29, n° 5, pagg. 777-784.
- [6] Mangialardi L., Mantriota G., (1999) "Power flows and efficiency in infinitely variable transmissions". Mechanism and Machine Theory, 34, pagg. 973-994.
- [7] Mantriota G. (2001), "Power Split Cvt Systems with High Efficiency", Proc. Instn Mech. Engrs, Part D- Journal of Automobile Engineering, Vol. 215, No D3, pp. 357-368.
- [8] Mattsson P. (1996), "Continuously Variable Split-Power transmissions with Several Modes", Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. ISBN 91-7197-356-7.
- [9] Mucino V. H., *et al.* (2001), "Design of continuously variable transmission system for automotive applications", Proceed. of Inst. of Mech. Engin., v. 215 Part D, pagg. 469-478.

- [10] Mucino V. H., *et al.* (1995) "A Double Planetary Gear Train-CVT Transmission with Multiple Applications." SAE paper n° 950094.
- [11] Sheu K.B. *et al.*, (1999) "New Automatic Hybrid Transmissions for Motorcycles", Proc. Natl. Sci. Council. ROC(A) Vol.23 No. 6, pp. 716-727.
- [12] Sorge, F., Beccari, A. and Cammalleri, M., (2001) "Operative Variator Characterization for CVT Improvement", The JSME Intern. Confer. on Motion and Power Transmissions, Fukuoka, Japan.
- [13] Vahabzadeh, H., Macey, J. P. and Dittrich O. (1990) "A Split-Torque, Geared-Neutral Infinitely Variable Transmission Mechanism", SAE paper n. 905089.