

9 SIMULACIÓ DELS ACCIONAMENTS I AVALUACIÓ ENERGÈTICA

En aquest capítol es presenta la simulació dels 3 accionaments d'una pota al llarg d'un cicle del moviment d'aquesta. L'objectiu final és avaluar l'energia intercanviada a cada element de l'accionament i l'energia elèctrica que cal subministrar als motors per aconseguir el moviment desitjat de la pota.

Cada cicle es compon de la fase de suport, durant la qual el peu corresponent recolza sobre el terra, i la fase de transferència, durant la qual el peu està aixecat i avança respecte al cos del robot sense tocar el terra.

En els diversos casos analitzats en aquest capítol es suposa que el robot camina en línia recta, sobre un terreny pla i horitzontal, a velocitat constant i seguint una anadura de trípodés alternants. S'analitzen 4 casos diferents, sempre considerant una velocitat d'avanç del robot de 160 mm/s o 9,6 m/min i un temps de cicle del moviment de la pota de 3 s. Llavors la cursa longitudinal del peu respecte al cos del robot és de 240 mm. Per tant tots els casos analitzats corresponen a la mateixa anadura i a idèntica velocitat d'avanç del robot, de manera que al final es poden comparar les despeses energètiques dels diferents casos per a un mateix moviment d'avanç del robot.

En dos dels casos analitzats es té la mateixa llei de moviment del peu respecte al cos, però corresponen a dues potes diferents. Així es pot comparar el comportament dels accionaments en una de les potes intermèdies del robot hexàpode, sobre la que durant tota la fase de suport recau la meitat del pes del robot, i en una de les potes de davant, sobre la que recau un percentatge variable del pes durant aquesta fase.

Els casos analitzats són els següents:

- Cas 1: Pota del mig a la dreta del robot segons la llei de moviment descrita al capítol 4
- Cas 2: Pota de davant a la dreta del robot segons la llei de moviment descrita al capítol 4
- Cas 3: Pota del mig a la dreta, amb el canvi respecte al cas 1 de que l'articulació 3 es manté fixa durant la fase de transferència
- Cas 4: Pota del mig a la dreta, amb el canvi respecte al cas 1 de que la cursa vertical del peu es redueix a una tercera part

9.1 Estudi del cas 1

9.1.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 1

Per estudiar el moviment del peu respecte al cos del robot s'utilitza el sistema de referència fix al cos descrit al capítol 4. Aquesta referència té l'origen a la intersecció dels eixos de les articulacions 1 i 2 de la pota, que és un punt fix al cos. L'eix x és en direcció longitudinal i el sentit positiu correspon al sentit d'avanç del robot. L'eix y és transversal i de sentit positiu apuntant cap a l'esquerra del robot. L'eix z forma un trièdre ortogonal directe amb els anteriors i per tant és vertical amb sentit positiu apuntant cap amunt.

Els paràmetres principals que defineixen la llei de moviment del peu respecte al cos del robot en el cas 1 es mostren a la Taula 9.1. La coordenada transversal del peu respecte al cos es manté constant en -170 mm, de manera que la trajectòria del peu és una corba situada sobre un pla paral·lel al pla sagital del robot.

Taula 9.1. Especificacions de la llei de moviment del peu en el cas 1

Cursa longitudinal del peu (cl)	240 mm
Cursa vertical del peu (cv)	75 mm
Coordenada transversal del peu (y_C)	-170 mm
Mínima coordenada vertical del peu (z_{Cmin})	-310 mm
Període d'anadura (T)	3 s

Aquest cas correspon a la llei de moviment de la pota definida al capítol 4. A la Figura 9.1 es mostra una vista en perspectiva de la trajectòria del peu respecte al cos del robot i els requeriments de velocitat angular i parell, al llarg d'un cicle, que es tenen a les 3 articulacions que formen part del mecanisme de la pota. La fase de suport, quan el peu està en contacte amb el terra, correspon a l'interval $0 \text{ s} \leq t \leq 1,5 \text{ s}$, i la fase de transferència correspon a la resta del cicle.

L'evolució de les velocitats angulars de les articulacions queda determinada per la trajectòria del peu. El moviment en direcció longitudinal del peu depèn principalment del moviment de l'articulació 1. Així ω_1 és negativa durant la fase de suport, al moure's el peu enrera respecte al cos, i és positiva durant la fase de transferència.

L'articulació 2 és la principal responsable del moviment vertical del peu i la 3 del moviment transversal. Per això aquestes articulacions es mouen a baixa velocitat durant la fase de suport. És a la fase de transferència i durant les operacions d'aixecar el peu, per a $1,5 \text{ s} \leq t \leq 2 \text{ s}$, i de baixar-lo, per a $2,5 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$, quan la velocitat d'aquestes articulacions és major.

A l'articulació 1 el parell requerit a la sortida de l'accionament, Γ_1 , només és apreciable al principi i al final de la fase de transferència, quan es produeix el canvi de sentit del moviment de la pota en direcció longitudinal.

El parell requerit a la sortida de l'accionament de l'articulació 2, Γ_2 , és negatiu i té un valor bastant elevat durant la fase de suport, doncs aquest parell ha de contrarestar el moment provocat per la força que el peu rep del terra durant aquesta fase. Durant la fase de transferència Γ_2 té el sentit contrari i un valor molt inferior, que és el necessari per contrarestar el moment provocat pel pes de la pota.

Pel que fa a l'articulació 3, el parell requerit a la sortida de l'accionament, Γ_3 , és negatiu al principi de la fase de suport, positiu a la zona intermèdia i torna a ser negatiu al final d'aquesta fase. Aquest parell és l'encarregat de contrarestar el moment que sobre l'articulació 3 provoca la força que el peu rep del terra, i aquest moment canvia de valor i de sentit segons la inclinació de la tibia respecte a la vertical. Durant la fase de transició el parell Γ_3 és pràcticament nul, doncs el pes de la tibia és molt reduït i aquesta es situa gairebé verticalment per sota de l'articulació 3.

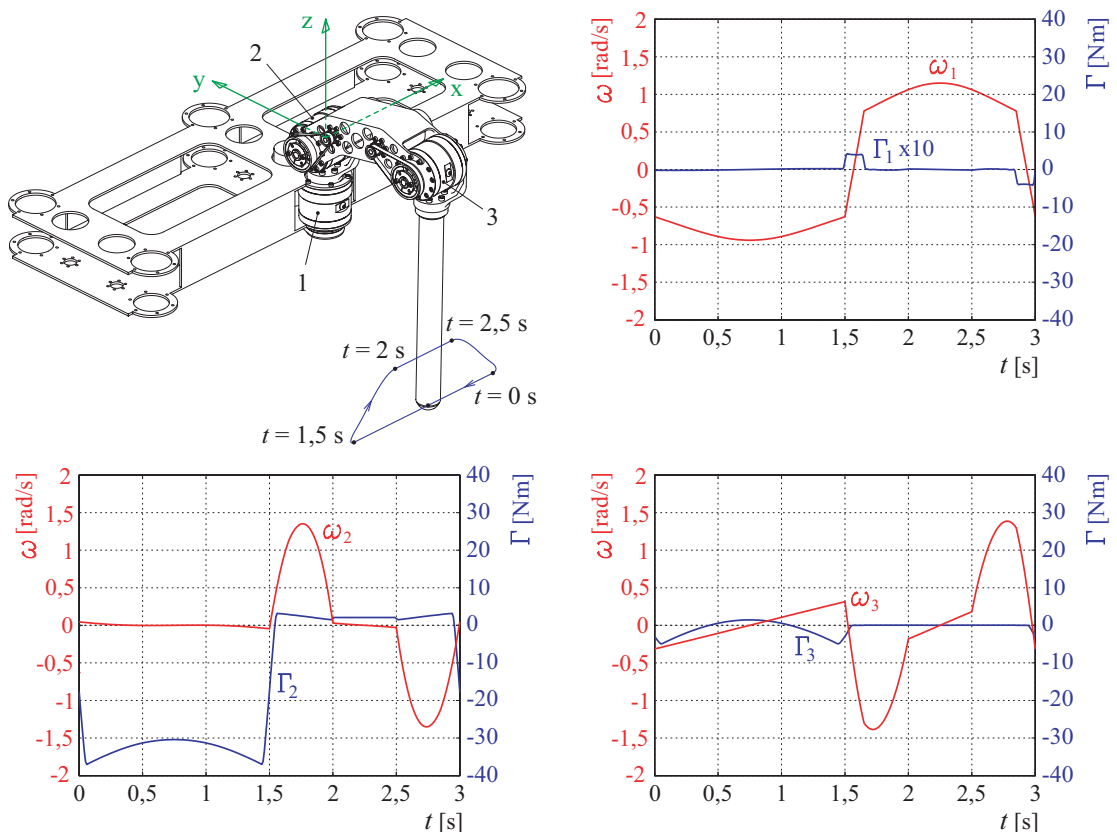


Fig. 9.1. Trajectòria del peu respecte al cos i requeriments a les articulacions en el cas 1

9.1.2 Simulació dels accionaments en el cas 1

S'analitzen per separat els accionaments corresponents a les 3 articulacions de la pota. Per a cada articulació es presenten els resultats de la simulació del funcionament dels diferents elements que formen l'accionament segons els models dels mateixos definits en capítols anteriors.

Per als elements de transmissió, el reductor *HD* i la transmissió per corretja dentada, es presenten els parells que actuen als arbres d'entrada i de sortida de cada element. També es mostren els parells de fregament que actuen a cada arbre segons els models de resistències passives definits.

Posteriorment es realitzen els balanços de potència a cada element de transmissió, analitzant la potència que entra, la que surt i la potència associada a la variació de l'energia cinètica de cada sistema a cada instant al llarg del cicle.

Finalment es presenten els resultats de la simulació del motor elèctric. El primer pas és determinar el valor de les variables de l'alimentació elèctrica requerida a cada instant. A continuació es realitza el balanç de potències al motor, representant la potència mecànica proporcionada per aquest i la potència elèctrica que cal subministrar-li a cada instant.

Accionament de l'articulació 1

Parells que actuen al reductor *Harmonic Drive*[®]

A la Figura 9.2 es representa l'evolució dels parells que actuen a l'arbre d'entrada, i a la Figura 9.3 els que actuen a l'arbre de sortida, del reductor *HD* de l'articulació 1 en el cas 1. Les variables i els sentits positius de les mateixes corresponen a les representades a l'esquema del model del reductor de la Figura 8.1 del capítol anterior.

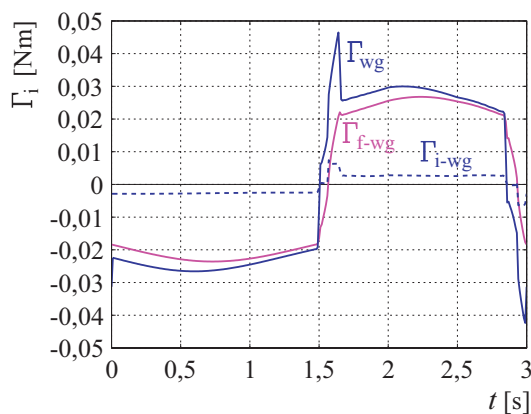


Fig. 9.2. Cas 1, articulació 1: parells que actuen a l'arbre d'entrada del reductor *HD*

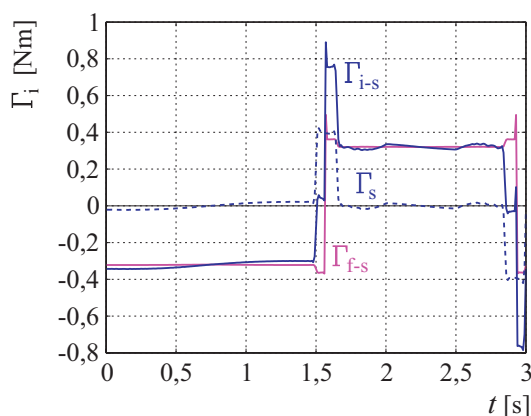


Fig. 9.3. Cas 1, articulació 1: parells que actuen a l'arbre de sortida del reductor *HD*

Al gràfic de la Figura 9.3 s'observa que el parell de fregament a l'arbre de sortida del reductor, Γ_{f-s} , és força important en comparació amb el parell a la sortida, Γ_s . El valor de Γ_{f-s} es manté aproximadament constant al llarg del cicle, però amb sentit canviant al oposar-se sempre al gir de l'articulació.

A l'arbre d'entrada (veure la Figura 9.2), el parell de fregament, Γ_{f-wg} , evoluciona de manera similar a la velocitat de gir de l'articulació. El seu valor és bastant superior al del parell requerit a la sortida d'aquest arbre, Γ_{i-wg} . Pel que respecta al parell a l'entrada de l'arbre, Γ_{wg} , es produeixen dos pics al principi i al final de la fase de transferència. El motiu és que en aquests moments cal accelerar angularment la inèrcia de l'arbre d'entrada.

Parells actuant a la transmissió per corretja dentada

A la Figura 9.4 es representa l'evolució dels parells que actuen a l'arbre d'entrada, i a la Figura 9.5 els que actuen a l'arbre de sortida, de la transmissió per corretja dentada de l'articulació 1 en el cas 1. Les variables i els sentits positius de les mateixes corresponen a les representades a l'esquema del model de la transmissió per corretja de la Figura 8.4 del capítol anterior.

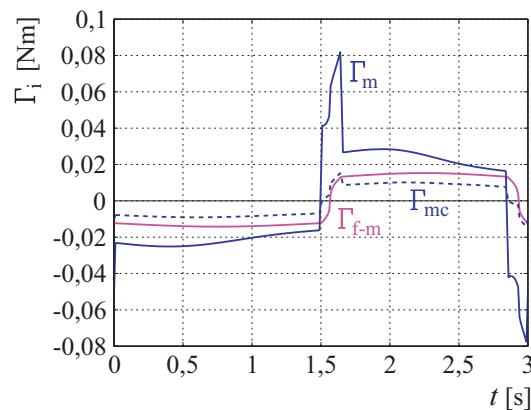


Fig. 9.4. Cas 1, articulació 1: parells que actuen a l'arbre d'entrada de la transmissió per corretja

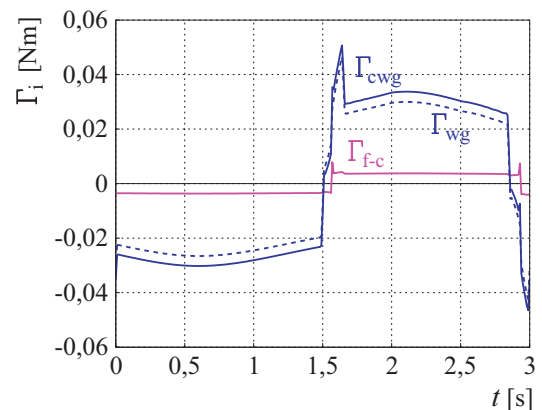


Fig. 9.5. Cas 1, articulació 1: parells que actuen a l'arbre de sortida de la transmissió per corretja

El parell de fregament a l'arbre de sortida, Γ_{f-c} al gràfic de la Figura 9.5, es comporta de manera similar al parell de fregament en l'arbre de sortida del reductor, mantenint un valor pràcticament constant i canviant de signe segons el sentit de rotació de l'arbre. En aquest arbre, però, la importància relativa del parell de fregament respecte al corresponent parell a la sortida, Γ_{wg} , és bastant inferior.

El parell de fregament a l'arbre d'entrada de la transmissió per corretja, Γ_{f-m} a la Figura 9.4, també evoluciona de manera semblant a la velocitat de l'articulació. Els

pics del parell a l'entrada, Γ_m , són encara més marcats que al reductor, doncs l'arbre d'entrada de la transmissió per corretja, que és el rotor del reductor, està sotmès a acceleracions angulars més elevades.

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.6 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor *HD* de l'accionament de l'articulació 1 en el cas 1. Les variables i els sentits positius d'aquestes corresponen a les representades a l'esquema del sistema format pel reductor de la Figura 8.3 del capítol anterior.

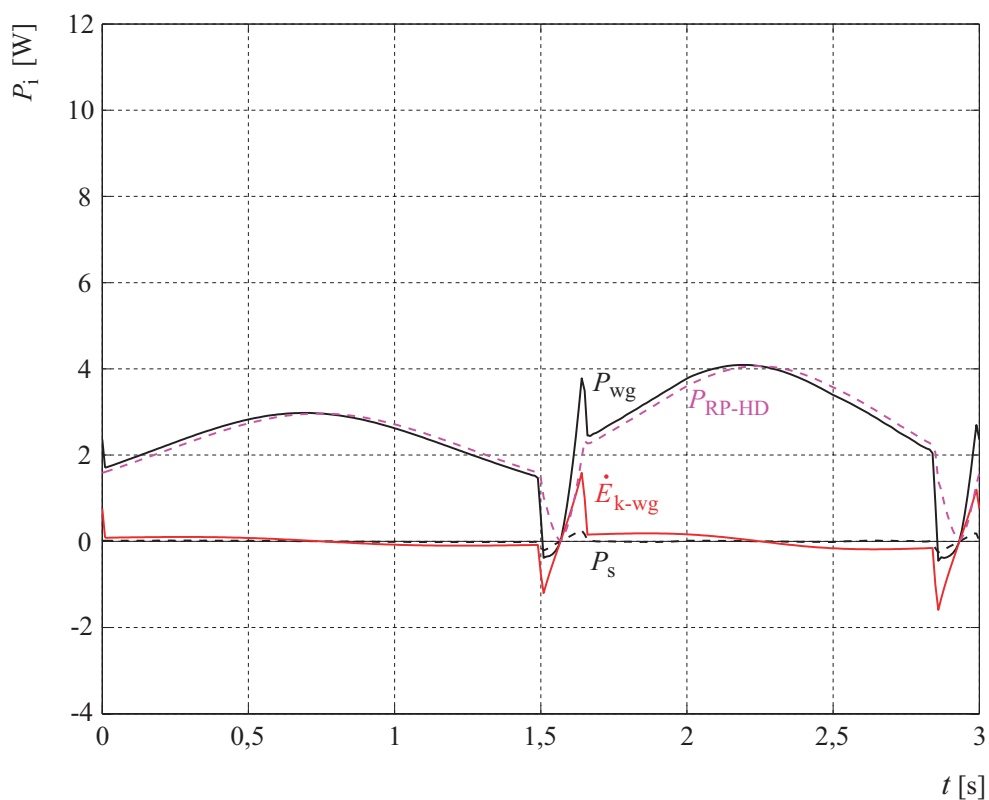


Fig. 9.6. Cas 1, articulació 1: potències que intervenen al reductor *HD* al llarg d'un cicle

S'observa que la potència transmesa a la sortida, P_s , és en la majoria de les situacions molt inferior a la potència requerida a l'entrada, P_{wg} , i la major part d'aquesta es destina a compensar la potència dissipada per les resistències passives, P_{RP-HD} . Al principi i al final de la fase de transició es tenen dues zones en les que la potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació de l'arbre d'entrada del reductor, \dot{E}_{k-wg} , té una influència important en la potència requerida a l'entrada del reductor.

El gràfic de la Figura 9.7 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'accionament de l'articulació 1 en el cas 1. Les variables i els sentits positius d'aquestes corresponen a les representades a l'esquema del sistema format per la transmissió per corretja de la Figura 8.6 del capítol anterior.

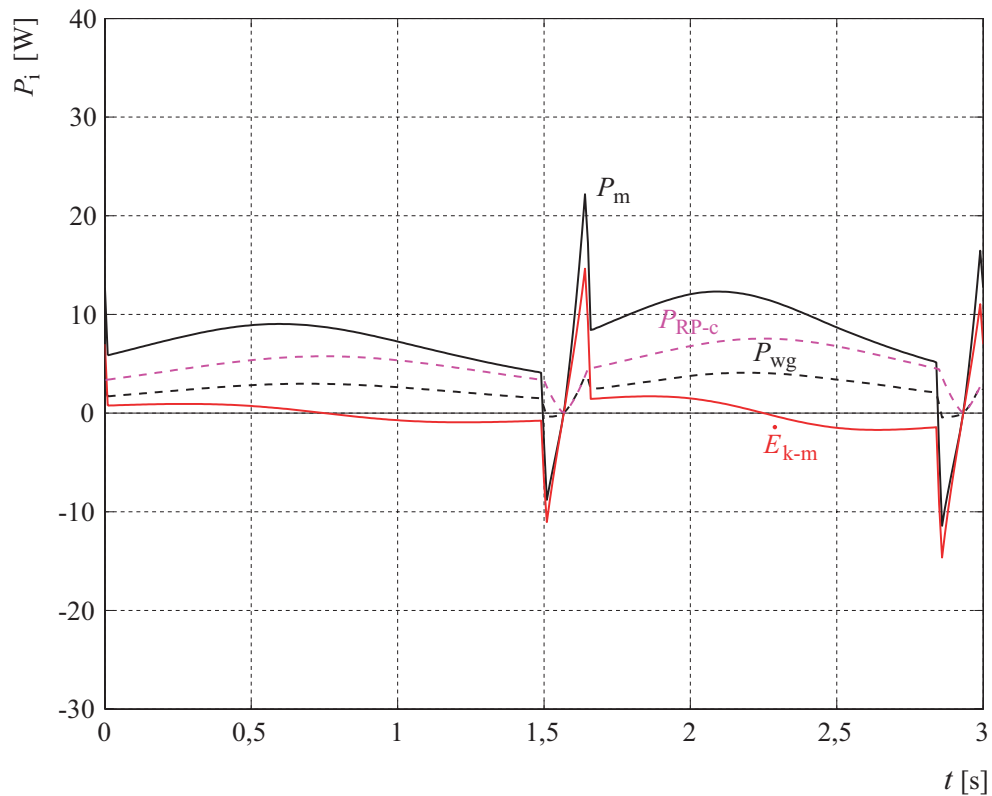


Fig. 9.7. Cas 1, articulació 1: potències que intervenen a la transmissió per corretja al llarg d'un cicle

La potència a la sortida d'aquest sistema és la que es té a l'entrada del reductor, P_{wg} . La potència dissipada per les resistències passives en aquest sistema, P_{RP-c} , és també important al llarg de pràcticament tot el cicle. La influència de la potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació del sistema, \dot{E}_{k-m} , al principi i al final de la fase de transició, és encara major que al reductor. La causa és que, tot i que el moment d'inèrcia del rotor és lleugerament menor que el de l'arbre d'entrada del reductor, la velocitat del primer és bastant superior.

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.8 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle. La forma de la corba del corrent d'alimentació, I_m , és la mateixa que la de la corba de parell motor (T_m a la Figura 9.4), doncs aquestes dues variables són sempre proporcionals. La corba de la tensió d'alimentació, U_m , és similar a la de la velocitat de gir (ω_1 a la Figura 9.1), doncs la caiguda de tensió per causa de la resistència

interna del motor és petita en front de la tensió induïda com a conseqüència de la velocitat de gir del motor

El gràfic de la Figura 9.9 mostra l'evolució al llarg del cicle de la potència mecànica proporcionada pel motor, P_m , i de la potència elèctrica que cal subministrar al motor, P_{ele} . Quan la potència mecànica és positiva, aquesta és només una mica inferior a la potència elèctrica que se li subministra, el que vol dir que en aquest cas i per aquest accionament el rendiment del motor és molt alt.

Hi ha situacions en que la potència elèctrica subministrada al motor, P_{ele} , és negativa, i per tant en aquestes situacions el motor funcionaria com a generador, subministrant potència elèctrica a la unitat d'alimentació.

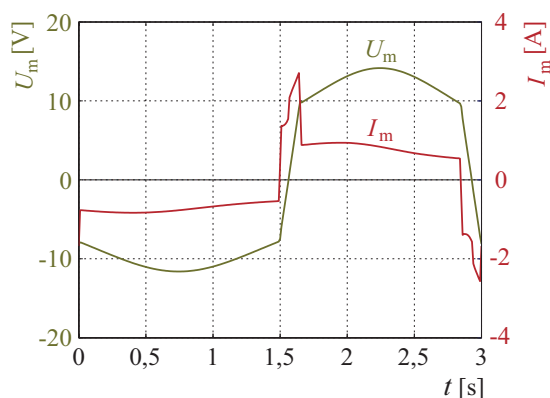


Fig. 9.8. Cas 1, articulació 1: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cicle

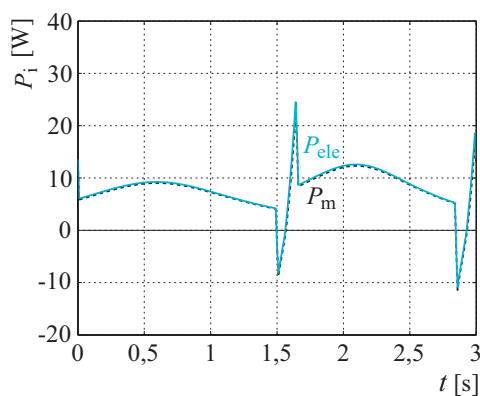


Fig. 9.9. Cas 1, articulació 1: potència mecànica que proporciona el motor i potència d'alimentació elèctrica

Accionament de l'articulació 2

Parells que actuen al reductor *Harmonic Drive*[®]

A la Figura 9.10 es representa l'evolució dels parells que actuen a l'arbre d'entrada, i a la Figura 9.11 els que actuen a l'arbre de sortida, del reductor *HD* de l'articulació 2 en el cas 1.

El parell de fregament a l'arbre de sortida del reductor, T_{f-s} a la Figura 9.11, canvia de sentit cada vegada que ho fa la velocitat de gir de l'articulació. La conseqüència és que es donen uns canvis bruscs en el valor del parell requerit a l'entrada d'aquest arbre, T_{i-s} .

El parell de fregament a l'arbre d'entrada, T_{f-wg} a la Figura 9.10, és molt baix durant la fase de suport, però passa a ser important quan l'articulació gira a velocitat elevada, al aixecar el peu, per a $1,5 \text{ s} < t < 2 \text{ s}$, i al baixar-lo, per a $2,5 \text{ s} < t < 3 \text{ s}$.

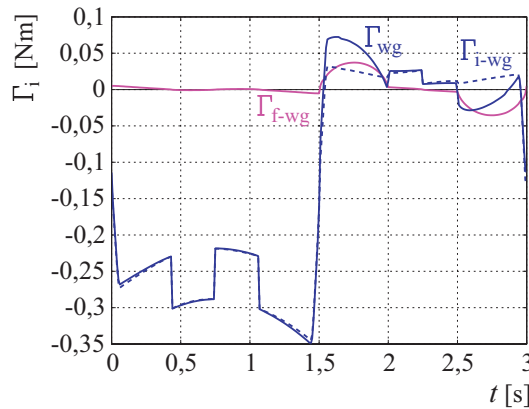


Fig. 9.10. Cas 1, articulació 2: parells que actuen a l'arbre d'entrada del reductor *HD*

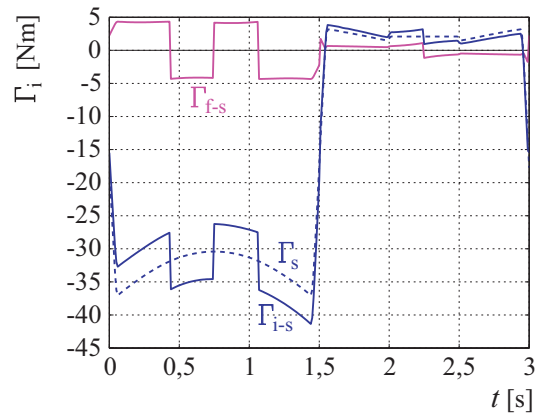


Fig. 9.11. Cas 1, articulació 2: parells que actuen a l'arbre de sortida del reductor *HD*

Parells que actuen a la transmissió per corretja dentada

A la Figura 9.12 es representa l'evolució dels parells que actuen a l'arbre d'entrada, i a la Figura 9.13 els que actuen a l'arbre de sortida, de la transmissió per corretja de l'articulació 2 en el cas 1.

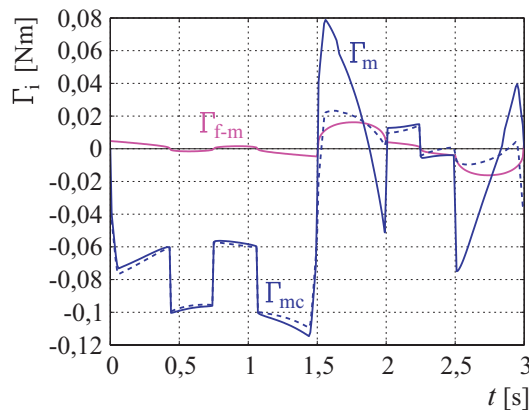


Fig. 9.12. Cas 1, articulació 2: parells que actuen a l'arbre d'entrada de la transmissió per corretja

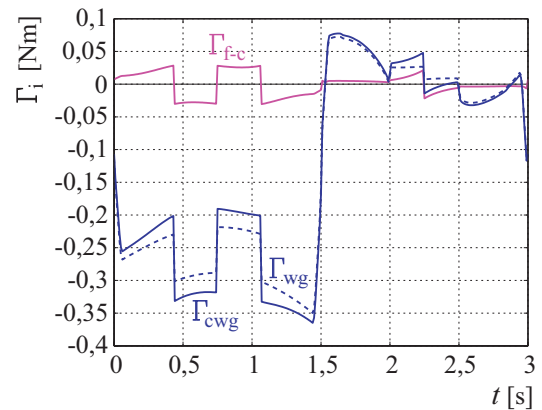


Fig. 9.13. Cas 1, articulació 2: parells que actuen a l'arbre de sortida de la transmissió per corretja

El parell de fregament a l'arbre de sortida, Γ_{f-c} al gràfic de la Figura 9.13, canvia de sentit cada vegada que ho fa la velocitat de gir. Això accentua els canvis bruscs que es donen en el parell requerit a l'entrada d'aquest arbre, Γ_{cwg} , sobretot durant la fase de suport.

El parell de fregament a l'arbre d'entrada de la transmissió per corretja, Γ_{f-m} a la Figura 9.12, és apreciable sobretot quan s'aixeca el peu i quan es baixa. Durant l'operació d'aixecar el peu, per a $1,5 \text{ s} < t < 2 \text{ s}$, la velocitat de l'articulació augmenta ràpidament al principi i disminueix al final. Això comporta unes elevades

acceleracions i desacceleracions del rotor, que es tradueixen en un parell motor Γ_m positiu i molt elevat al principi i un parell negatiu al final. Durant l'operació de baixar el peu aquest procés es repeteix en sentit contrari.

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.14 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor *HD* de l'accionament de l'articulació 2 en el cas 1.

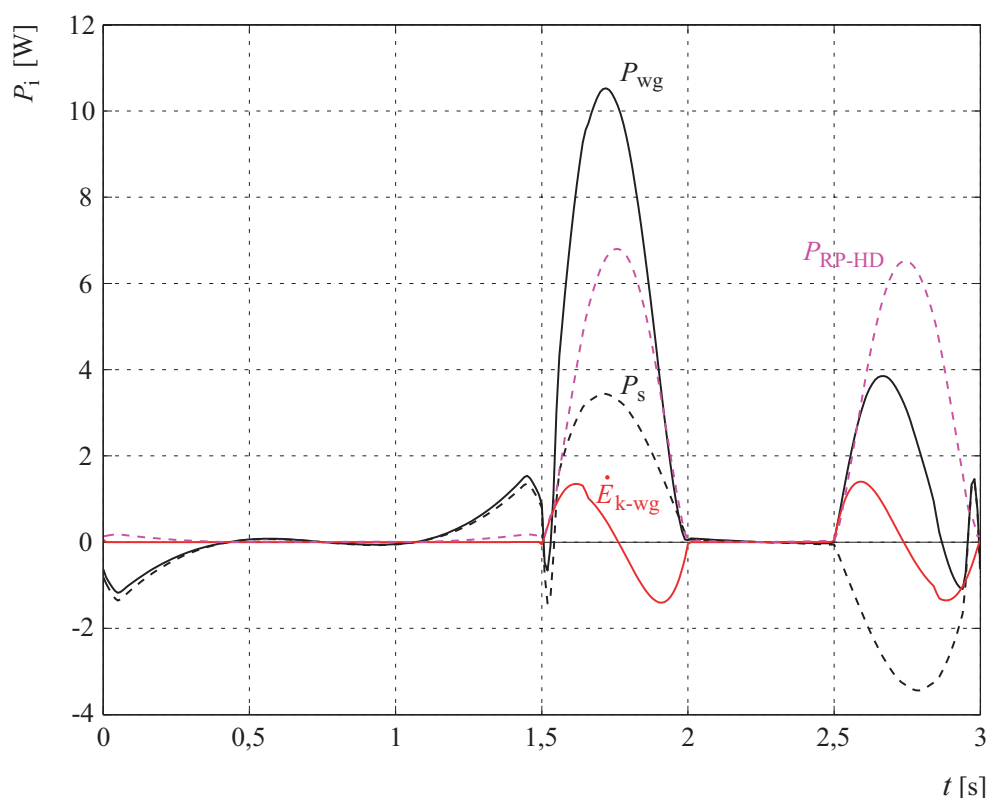


Fig. 9.14. Cas 1, articulació 2: potències que intervenen al reductor *HD* al llarg d'un cicle

Al principi de la fase de suport les potències a la sortida i a l'entrada del reductor, P_s i P_{wg} respectivament, són negatives, doncs l'accionament actua com a fre. Al final d'aquesta fase s'inverteix el sentit al actuar l'accionament com a motor. A la zona intermèdia de la fase de suport, per a $0,5 \text{ s} < t < 1 \text{ s}$, les potències involucrades són pràcticament nul·les, doncs tot i que el parell requerit a la sortida és elevat, la velocitat de rotació és molt baixa.

Durant la fase de transferència la potència mecànica a la sortida de l'accionament, P_s , és positiva al aixecar el peu i negativa al baixar-lo. És interessant observar que durant aquesta fase l'energia intercanviada pel reductor és molt superior que durant la fase de suport. La potència dissipada per les resistències passives, P_{RP-HD} , és important

quan l'articulació gira a velocitat elevada, al aixecar i al baixar el peu. La potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació de l'arbre d'entrada del reductor, \dot{E}_{k-wg} , té una influència notòria en la potència requerida a l'entrada del reductor.

El gràfic de la Figura 9.15 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'accionament de l'articulació 2 en el cas 1.

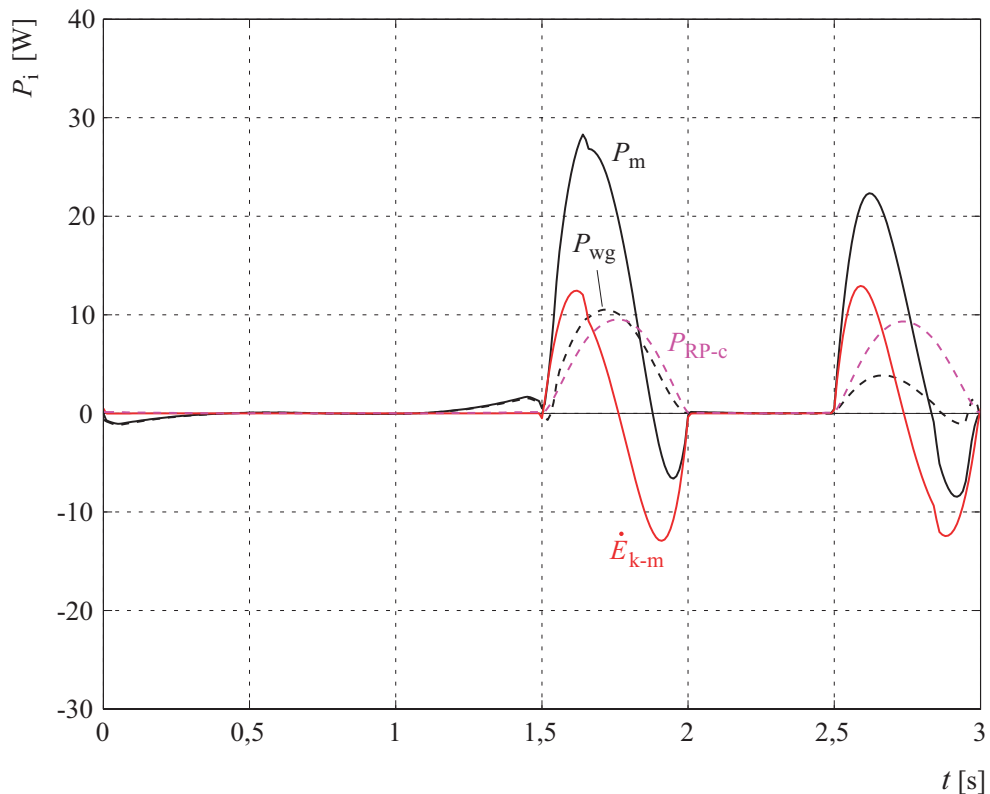


Fig. 9.15. Cas 1, articulació 2: potències que intervenen a la transmissió per corretja al llarg d'un cicle

La potència dissipada per les resistències passives en aquest sistema, P_{RP-c} , és força important al aixecar i al baixar el peu, i supera amb escreix la potència mecànica a la sortida de la transmissió per corretja, P_{wg} , durant l'operació de baixar el peu. La potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació del sistema, \dot{E}_{k-m} , té un paper clau en aquestes operacions, i provoca que la potència mecànica demanada al motor, P_m , sigui negativa al final de les mateixes.

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.16 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle. La forma de la corba del corrent d'alimentació, I_m , és la mateixa que la de corba

de parell motor (Γ_m a la Figura 9.12). La corba de la tensió d'alimentació, U_m , és similar a la de la velocitat de gir (ω_2 a la Figura 9.1), tot i que durant la fase de suport s'observa l'efecte de la caiguda de tensió a causa de la resistència interna del motor i de l'elevat corrent d'alimentació durant aquesta fase.

El gràfic de la Figura 9.17 mostra l'evolució al llarg del cicle de la potència mecànica proporcionada pel motor, P_m , i de la potència elèctrica que cal subministrar al motor, P_{ele} . Durant la fase de suport la potència elèctrica amb la que cal alimentar el motor és superior, o en dues zones molt superior, a la potència mecànica que aquest proporciona. Per tant el rendiment del motor durant aquesta fase és bastant baix.

Durant la fase de transició, al final de les operacions d'aixecar i de baixar el peu, hi ha dues zones en les que la potència mecànica proporcionada pel motor i la potència elèctrica amb la que cal alimentar-lo són negatives. En aquestes zones el motor funciona com a generador.

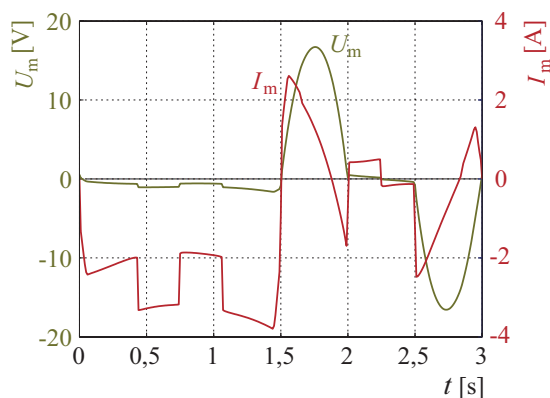


Fig. 9.16. Cas 1, articulació 2: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cicle

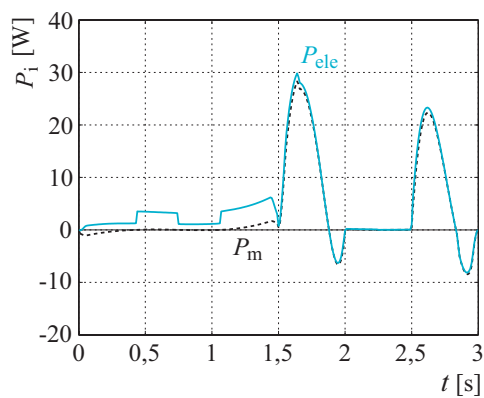


Fig. 9.17. Cas 1, articulació 2: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

Accionament de l'articulació 3

Parells que actuen al reductor *Harmonic Drive*[®]

A la Figura 9.18 es representa l'evolució dels parells que actuen a l'arbre d'entrada, i a la Figura 9.19 els que actuen a l'arbre de sortida, del reductor *HD* de l'articulació 3 en el cas 1.

Al gràfic de la Figura 9.19 s'observa que el parell de fregament a l'arbre de sortida del reductor, Γ_{f-s} , canvia diverses vegades de sentit, i el seu valor durant pràcticament tota la fase de transferència correspon al fregament en buit. Els petits pics que es tenen abans i després del canvi de sentit són deguts a l'efecte Striebeck.

A l'arbre d'entrada del reductor, el parell de fregament Γ_{f-wg} (veure la Figura 9.18) és variable al llarg de tot el cicle, essent més elevat sobretot al aixecar i al baixar el peu, quan l'articulació 3 ha de girar a major velocitat per corregir el moviment del peu i mantenir la seva trajectòria sobre el mateix pla vertical. Durant aquestes operacions s'aprecia l'efecte de la inèrcia d'aquest arbre del reductor en el parell requerit a la seva entrada, Γ_{wg} .

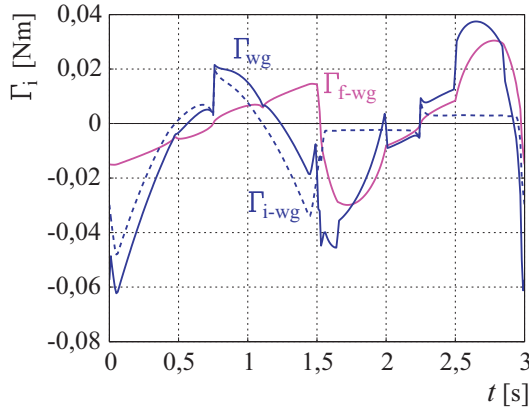


Fig. 9.18. Cas 1, articulació 3: parells que actuen a l'arbre d'entrada del reductor *HD*

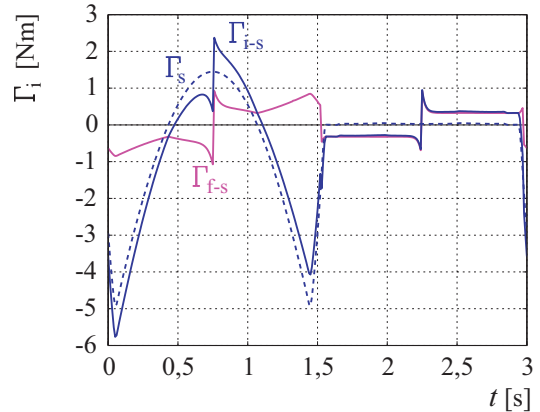


Fig. 9.19. Cas 1, articulació 3: parells que actuen a l'arbre de sortida del reductor *HD*

Parells que actuen a la transmissió per corretja dentada

A la Figura 9.20 es representa l'evolució dels parells que actuen a l'arbre d'entrada, i a la Figura 9.21 els que actuen a l'arbre de sortida, de la transmissió per corretja de l'articulació 3 en el cas 1.

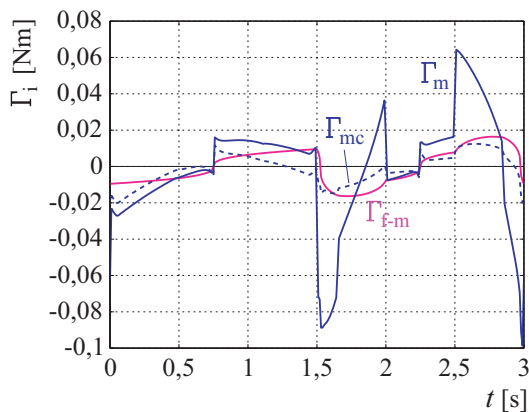


Fig. 9.20. Cas 1, articulació 3: parells que actuen a l'arbre d'entrada de la transmissió per corretja

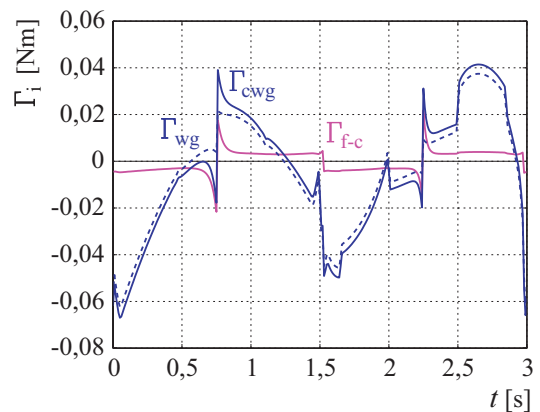


Fig. 9.21. Cas 1, articulació 3: parells que actuen a l'arbre de sortida de la transmissió per corretja

A la corba del parell de fregament a l'arbre de sortida, Γ_{f-c} a la Figura 9.21, els pics per efecte Striebeck són força marcats a la meitat de les fases de suport i de transferència, quan els canvis de sentit de gir es produeixen amb una acceleració

baixa. La corba de parell que ha d'exercir el motor, Γ_m a la Figura 9.20, mostra l'important efecte de la inèrcia del conjunt del rotor durant les operacions d'aixecar i de baixar el peu.

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.22 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor *HD* de l'accionament de l'articulació 3 en el cas 1.

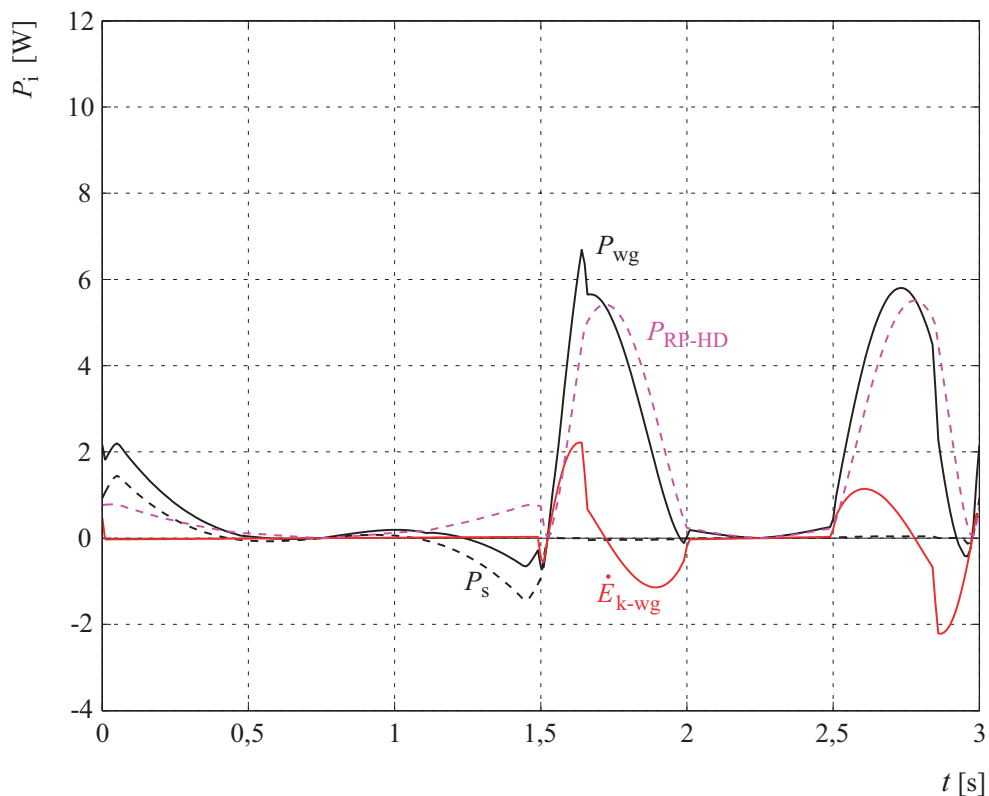


Fig. 9.22. Cas 1, articulació 3: potències que intervenen al reductor *HD* al llarg d'un cicle

Al principi de la fase de suport la potència transmesa a la sortida del reductor, P_s , és positiva. Per tant l'accionament funciona com a motor. Al final d'aquesta fase P_s és negativa i l'accionament funciona com a fre. En aquest moment les resistències passives del reductor s'encarreguen de dissipar bona part de la potència mecànica de frenada.

Durant la fase de transferència la potència a la sortida del reductor és pràcticament nul·la. Al aixecar i al baixar el peu, per a $1,5 < t < 2$ i per a $2,5 < t < 3$ respectivament, la potència dissipada per les resistències passives és força elevada. El valor de la potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació, \dot{E}_{k-wg} , també és

important durant aquestes operacions, doncs l'arbre d'entrada accelera i desaccelera ràpidament per cada operació.

El gràfic de la Figura 9.23 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'accionament de l'articulació 3 en el cas 1.

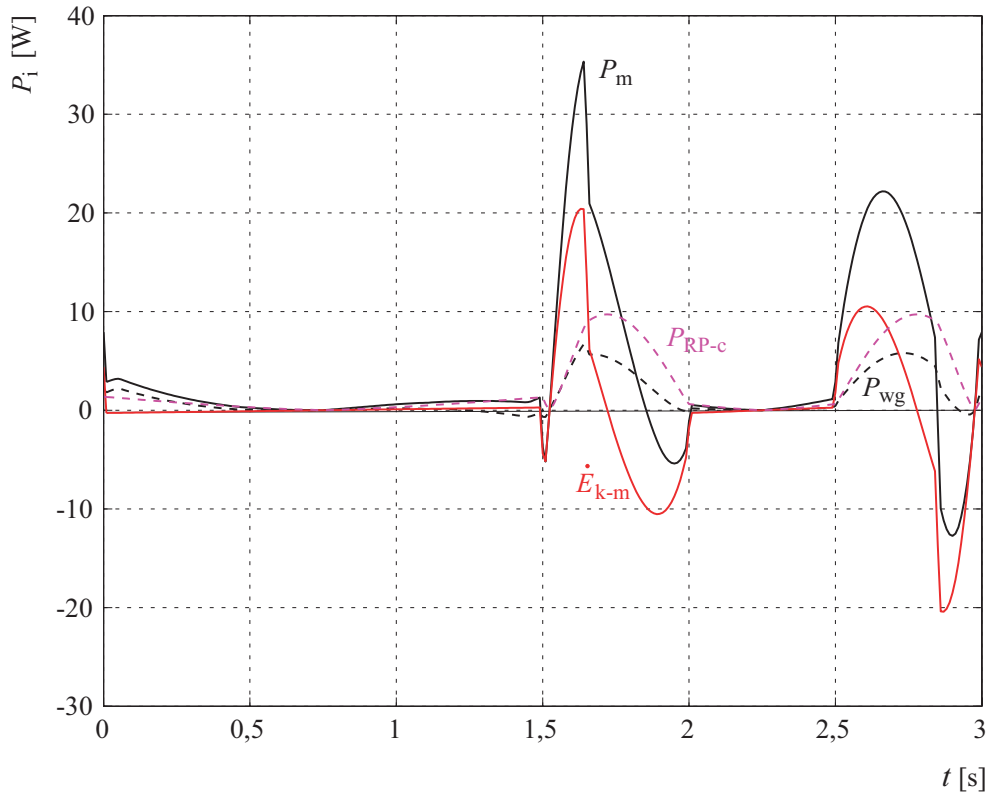


Fig. 9.23. Cas 1, articulació 3: potències que intervenen a la transmissió per corretja al llarg d'un cicle

Al final de la fase de suport les resistències passives fan que la potència a l'entrada de la transmissió per corretja, P_m , sigui positiva, tot i que la potència que transmet a la sortida, P_{wg} , és negativa. La potència dissipada per les resistències passives en aquest element de transmissió és també important durant les operacions d'aixecar i de baixar el peu. La potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació, \dot{E}_{k-m} , arriba a valors força elevats durant aquestes operacions.

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.24 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle en el cas 1 i per a l'accionament de l'articulació 3. Com a les altres articulacions, la forma de la corba del corrent d'alimentació, I_m , és la mateixa que la del parell motor (T_m a la Figura 9.20) i la de la tensió d'alimentació, U_m , és similar a la de la velocitat de gir de l'articulació (ω_3 a la Figura 9.1).

El gràfic de la Figura 9.25 mostra l'evolució al llarg del cicle de la potència mecànica proporcionada pel motor, P_m , i de la potència elèctrica que cal subministrar al motor, P_{ele} . Quan la potència mecànica és positiva, aquesta és només una mica inferior a la potència elèctrica que se li subministra, el que vol dir que en aquestes situacions el rendiment del motor és elevat. Hi ha tres zones, una de les quals de molt poca durada al voltant de $t = 1,5$ s, en les que el motor funciona com a generador.

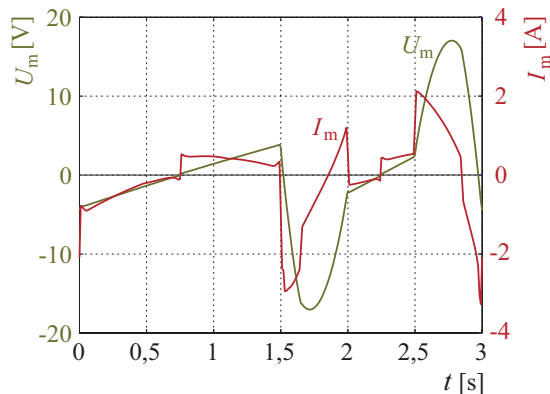


Fig. 9.24. Cas 1, articulació 3: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cicle

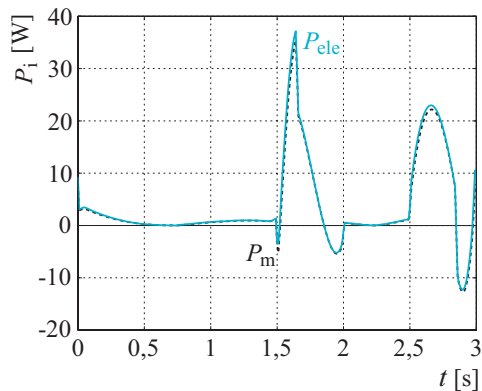


Fig. 9.25. Cas 1, articulació 3: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

9.1.3 Avaluació energètica d'un cicle en el cas 1

La integració de les corbes de potència al llarg d'un període permet avaluar l'energia involucrada, a l'entrada i a la sortida de cada element de l'accionament, per cada cicle de moviment del mecanisme.

Per a cada corba de potència s'han avaluat dues integrals, corresponents a les àrees definides per la corba per sobre de l'origen, quan la potència és positiva segons el criteri de signes establert, i per sota de l'origen, quan la potència és negativa. Així s'obté per un costat l'energia intercanviada en el sentit més normal de treball de l'accionament, quan l'energia es transmet des de l'alimentació del motor fins a la sortida de l'accionament, i per l'altre l'energia intercanviada en sentit invers.

A la Figura 9.26 es mostra un diagrama de blocs de l'accionament amb els elements que el formen. Cal recordar que el rotor del motor, amb la seva inèrcia, es considera com a part del sistema que representa la transmissió per corretja. La politja gran de la transmissió per corretja, que és fixa a l'arbre d'entrada del reductor HD , es considera una part inclosa en el sistema del reductor, i no forma part d'aquest sistema l'arbre de sortida del reductor, que és solidari al membre de la pota governat per l'accionament.

Al mateix diagrama de la Figura 9.26 es representen les variables d'energia intercanviada que s'han avaluat amb les integracions comentades. Els resultats numèrics d'aquestes integracions en el cas 1 es mostren a la Taula 9.2.

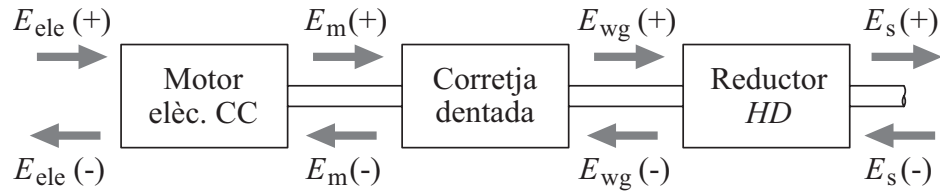


Fig. 9.26. Diagrama de blocs de l'accionament i variables d'energia avaluades

Taula 9.2. Energia total per cicle a les diferents articulacions en el cas 1

	articulació 1		articulació 2		articulació 3		Total	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
E_s [J]	0,034	-0,036	1,39	-1,39	0,314	-0,314	1,741	-1,743
E_{wg} [J]	7,84	-0,041	4,33	-0,312	3,81	-0,117	15,98	-0,470
E_m [J]	23,93	-0,836	11,52	-1,61	12,51	-1,85	47,96	-4,303
E_{ele} [J]	24,70	-0,748	15,62	-1,34	13,29	-1,71	53,62	-3,795

L'energia per cicle a la sortida del reductor, E_s , és l'energia mecànica necessària per governar el moviment de l'articulació. Aquesta seria l'única energia que hauria de proporcionar, i de dissipar, un accionament ideal, que no tingués resistències passives i la inèrcia a rotació del qual fos negligible.

En el cas 1, les energies totals transmises a la sortida del reductor en sentit directe, $E_s(+)$, i en sentit invers, $E_s(-)$, han de ser iguals, perquè el moviment de la pota segueix un cicle en el que no hi ha increment d'energia potencial. La lleugera diferència entre aquestes variables a la Taula 9.2 és atribuïble al procediment de càlcul del programa de simulació de mecanismes, al que s'han introduït les dades al llarg del cicle de forma tabular.

A les tres articulacions l'energia E_s en sentit positiu és pràcticament igual en valor que E_s en sentit negatiu, doncs a cada articulació es donen tantes situacions en que l'accionament impulsa el moviment com situacions contraries en les que frena el moviment de l'articulació. L'explicació d'aquesta coincidència és que el moviment de la pota és simètric respecte al pla y-z, i la força que el peu rep del terra en un determinat punt de la trajectòria durant la fase de suport, és sempre igual a la que rep en el punt simètric respecte al pla y-z.

L'energia transmesa en el sentit normal o directe de la corretja al reductor, $E_{wg}(+)$, és molt més gran que l'energia transmesa del reductor a l'articulació, $E_s(+)$, perquè part de la primera es dissipa a les resistències passives del reductor i una altra part es

destina a accelerar angularment el seu arbre d'entrada. A l'accionament de l'articulació 1 aquesta diferència és molt marcada, com a conseqüència de que les resistències passives del reductor corresponent dissipen molta energia.

L'energia mecànica transmesa del motor a la corretja, $E_m(+)$, també es bastant superior a l'energia mecànica que aquest transmet al reductor, $E_{wg}(+)$. Les causes d'aquestes diferències són també les resistències passives i l'acceleració de l'arbre d'entrada de la transmissió per corretja, que inclou el rotor del motor.

L'energia que entra al reductor com a conseqüència del parell actuant sobre la sortida del reductor en sentit contrari al sentit de la velocitat angular, $E_s(-)$, juntament amb la disminució de l'energia cinètica de rotació del reductor, es reparteixen entre energia dissipada per les pròpies resistències passives i energia transmesa en sentit invers cap a la corretja, $E_{wg}(-)$. Llavors si l'energia dissipada per les resistències passives és major que la disminució d'energia cinètica que es dona al llarg del cicle, implica que $E_{wg}(-)$ és menor que $E_s(-)$, com passa a les articulacions 2 i 3. A la transmissió per corretja dentada es tenen uns intercanvis d'energia en sentit invers equivalents als del reductor.

Analitzant els resultats de la Taula 9.2 que corresponen al motor, l'energia mecànica proporcionada per aquest, $E_m(+)$, és a totes les articulacions menor que l'energia elèctrica que se li subministra, $E_{ele}(+)$. Quan aquesta diferència és més gran, com per exemple a l'articulació 2, vol dir que el rendiment mitjà del motor és menor. En el sentit invers, l'energia elèctrica generada pel motor, $E_{ele}(-)$, és sempre menor que l'energia mecànica que aquest rep de la transmissió per corretja, $E_m(-)$.

En conjunt, el total d'energia elèctrica que cal subministrar als 3 motors per tal de completar un cicle en el cas 1 és de 53,62 J. Com es pot observar aquesta energia és molt superior als 1,741 J que es requeririen si es disposés d'accionaments ideals sense resistències passives ni inèrcia.

Per altra banda el motors generen al llarg del cicle 3,795 J que, si el sistema d'alimentació ho permet, es poden emmagatzemar o utilitzar per alimentar altres motors.

9.2 Estudi del cas 2

9.2.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 2

S'analitza en aquest apartat el cas de la pota de davant a la dreta seguint una llei de moviment equivalent a la del cas 1, amb la diferència de que el moviment de la pota

de davant presenta un desfasament de mig període respecte a la pota del mig del mateix costat.

Com que el que interessa en aquest estudi és analitzar el funcionament al llarg de tot un cicle, i per facilitar la comparació amb la pota del mig del cas 1, en aquest cas també s'ha considerat que el cicle comença al principi de la fase de suport. Llavors la trajectòria del peu respecte a la referència corresponent fixa al cos del robot és idèntica a la que es té en el cas 1.

A la Figura 9.27 es mostra una vista en perspectiva de la trajectòria del peu de davant a la dreta respecte al cos del robot i els requeriments que es tenen a les 3 articulacions del mecanisme de la pota. L'evolució de les velocitats és idèntica a la del cas 1.

Els requeriments de parell a les articulacions 2 i 3 durant la fase de suport són clarament diferents a les del cas 1, doncs al principi d'aquesta fase el percentatge de pes que recolza sobre la pota de davant és bastant inferior al que ho fa sobre la pota del mig. Tot i així aquest percentatge augmenta al llarg de la fase de suport.

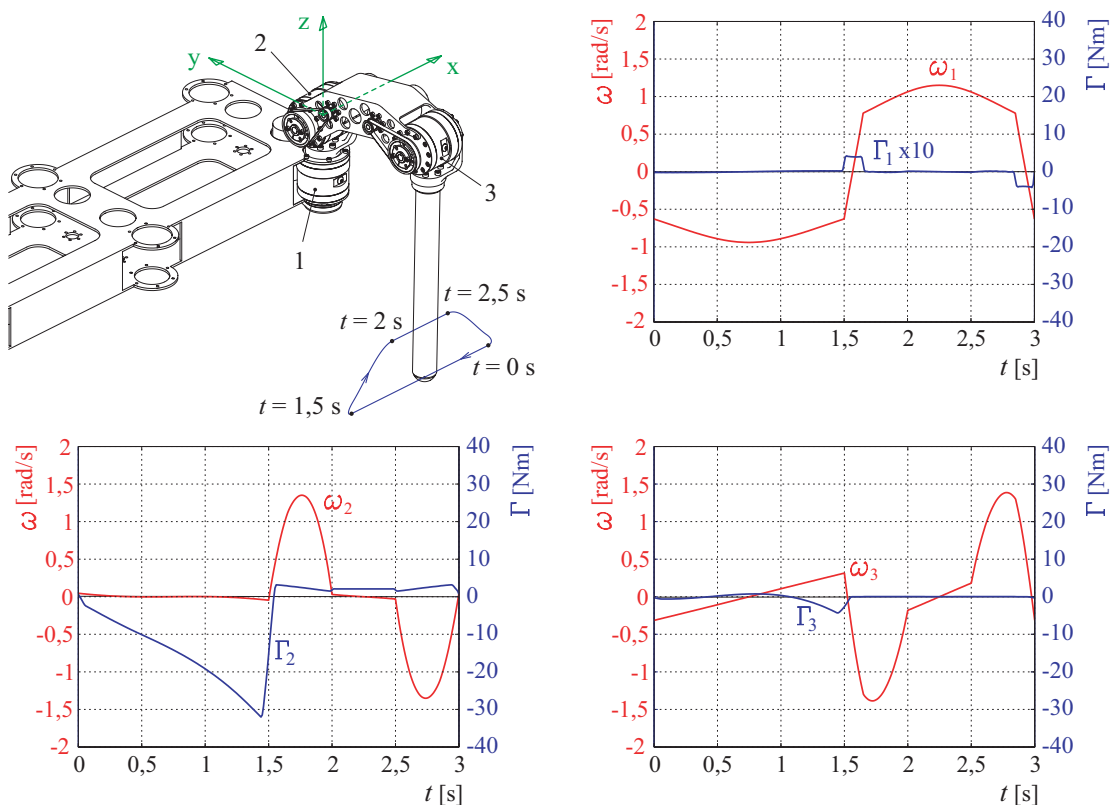


Fig. 9.27. Trajectòria del peu respecte al cos i requeriments a les articulacions en el cas 2

9.2.2 Simulació dels accionaments en el cas 2

S'analitzen per separat els accionaments corresponents a les 3 articulacions de la pota. Per a cada element de transmissió es presenten directament els resultats dels

balanços de potència per a cada instant al llarg del cicle. Després es mostren els resultats de la simulació del motor elèctric, amb les variables de l'alimentació elèctrica requerida i el balanç de potències al motor.

Accionament de l'articulació 1

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.28 mostra l'evolució de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor *HD* de l'articulació 1 en el cas 2. Aquest gràfic és pràcticament idèntic al de la Figura 9.6, que correspon al mateix reductor en el cas 1, doncs els requeriments a l'articulació són gairebé iguals.

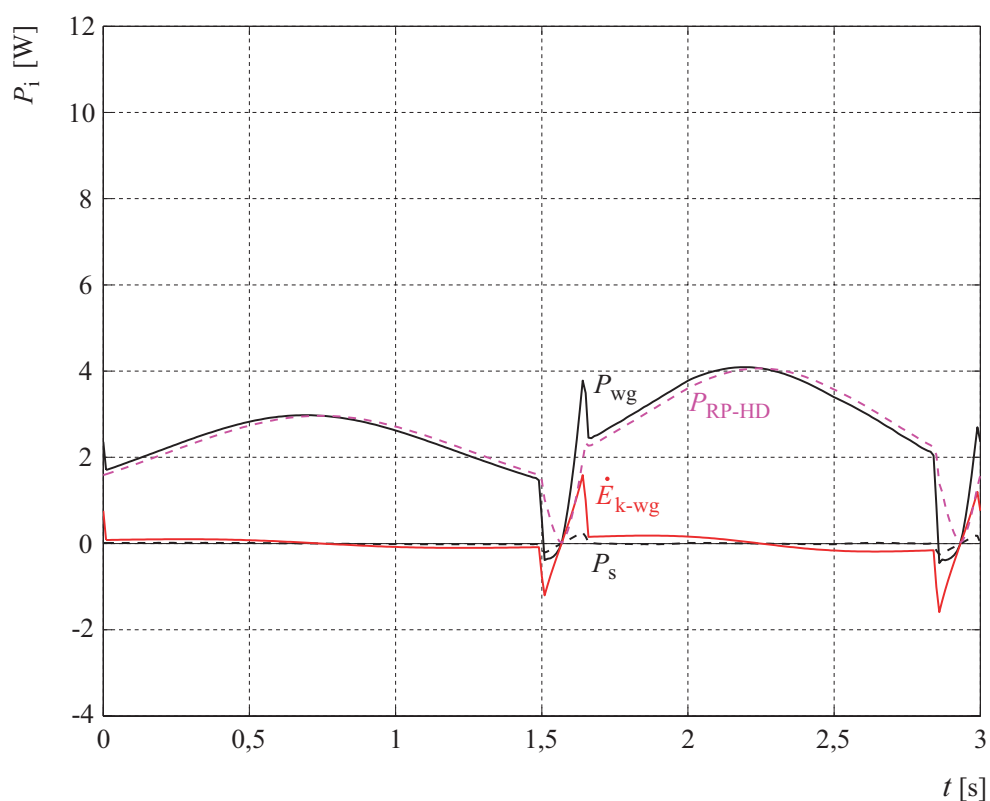


Fig. 9.28. Cas 2, articulació 1: potències que intervenen al reductor *HD* al llarg d'un cicle

El gràfic de la Figura 9.29 mostra l'evolució de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'articulació 1 en el cas 2. Aquest també és pràcticament idèntic al corresponent gràfic del cas 1 (veure la Figura 9.7).

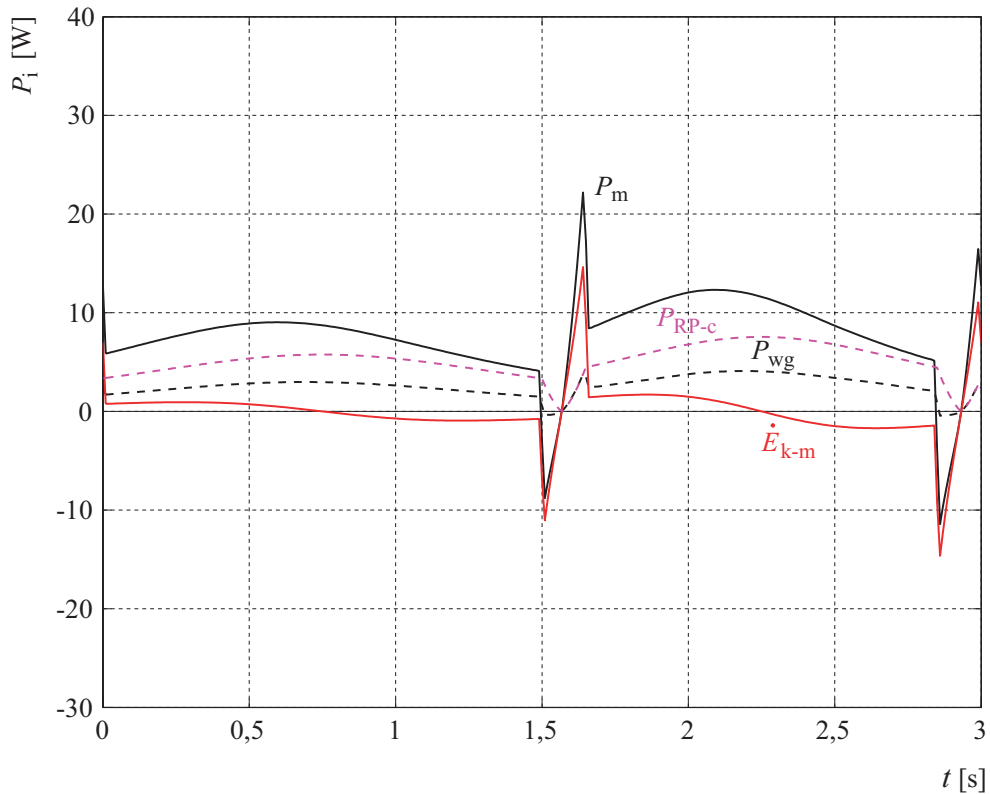


Fig. 9.29. Cas 2, articulació 1: potències que intervenen a la transmissió per corretja al llarg d'un cicle

Simulació del motor elèctric

Els resultats de la simulació del motor de l'articulació 1 en el cas 2 es presenten als gràfics de les Figures 9.30 i 9.31. Aquests són pràcticament iguals que els resultats de la mateixa articulació en el cas 1 (veure les Figures 9.8 i 9.9).

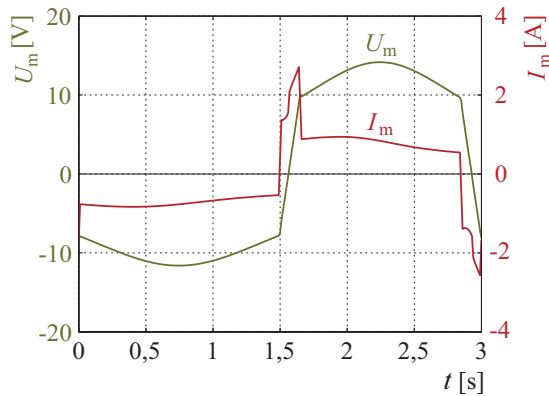


Fig. 9.30. Cas 2, articulació 1: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cicle

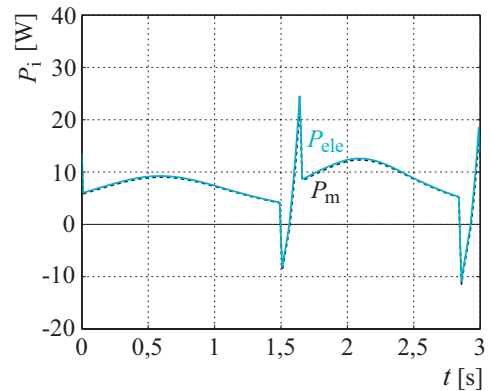


Fig. 9.31. Cas 2, articulació 1: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

Accionament de l'articulació 2

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.32 mostra l'evolució de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor *HD* de l'articulació 2 en el cas 2. Comparant els resultats amb el corresponent gràfic del cas 1 (veure la Figura 9.14), en aquest cas al principi de la fase de suport, la potència amb la que cal frenar l'articulació, P_s , és molt menor, pràcticament nul·la. També és menor la potència dissipada per les resistències passives, P_{RP-HD} . A la resta del cicle els resultats són molt similars al cas 1.

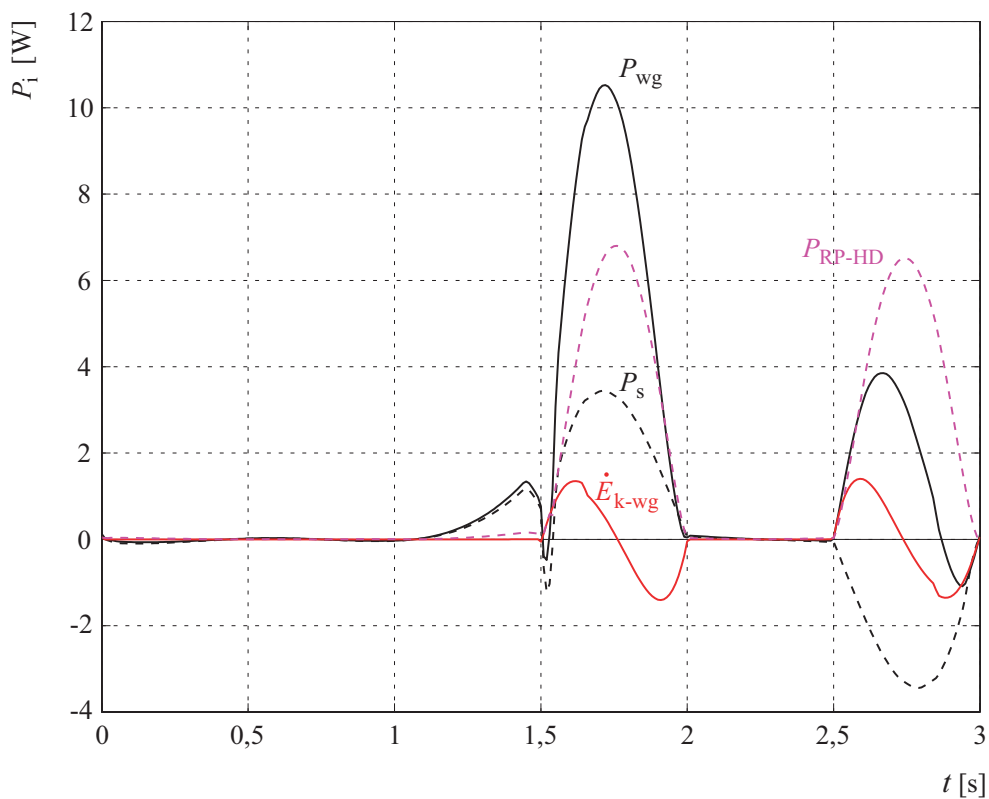


Fig. 9.32. Cas 2, articulació 2: potències que intervenen al reductor *HD* al llarg d'un cicle

El gràfic de la Figura 9.33 mostra l'evolució de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'articulació 2 en el cas 2. La diferència amb el cas 1 es limita també al principi de la fase de suport. En aquesta part del cicle la potència dissipada per les resistències passives de la transmissió per corretja dentada, P_{RP-c} , és pràcticament inapreciable, al igual que la potència mecànica demanada al motor, P_m .

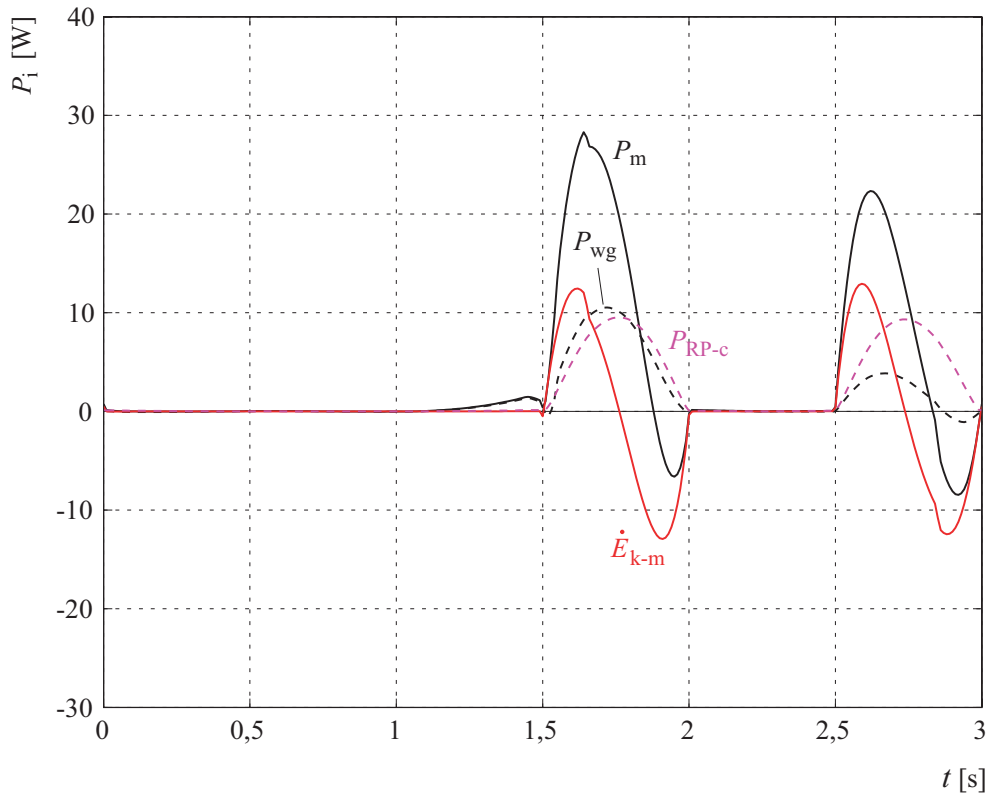


Fig. 9.33. Cas 2, articulació 2: potències que intervien en la transmissió per corretja al llarg d'un cicle

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.34 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle. Comparant aquest gràfic amb el del cas 1 (veure la Figura 9.16), el corrent d'alimentació I_m al principi de la fase de suport és també negatiu, però de molt menor magnitud, i després va augmentant. També es donen els canvis bruscs de valor del corrent provocats pels canvis de sentit dels parells de fregament a la transmissió.

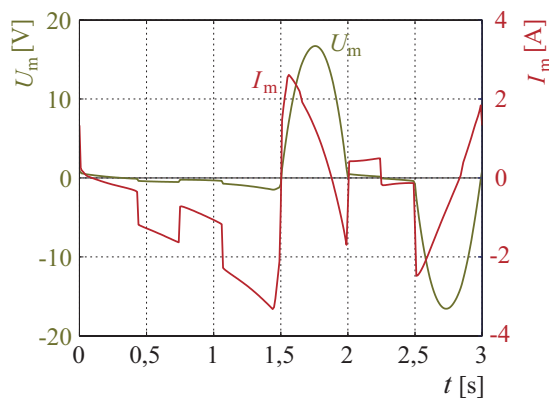


Fig. 9.34. Cas 2, articulació 2: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cicle

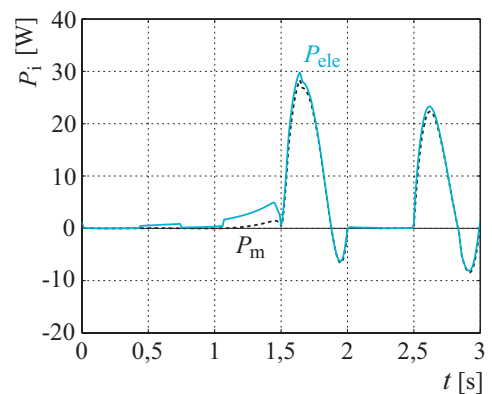


Fig. 9.35. Cas 2, articulació 2: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

El gràfic de la Figura 9.35 mostra l'evolució al llarg del cicle de la potència mecànica proporcionada pel motor, P_m , i de la potència elèctrica que cal subministrar al motor, P_{ele} . En quant a la potència mecànica només s'aprecia una petita diferència respecte al cas 1 al principi de la fase de suport. La potència elèctrica que cal subministrar al motor és clarament inferior durant la fase de suport, al ser inferior el corrent d'alimentació.

Accionament de l'articulació 3

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.36 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor HD de l'accionament de l'articulació 3 en el cas 2. Les diferències amb el corresponent gràfic del cas 1 (veure la Figura 9.22) es donen al principi de la fase de suport. En aquest moment la potència requerida a la sortida de l'accionament, P_s , és menor i com a conseqüència també és menor la potència requerida a l'entrada del reductor, P_{wg} .

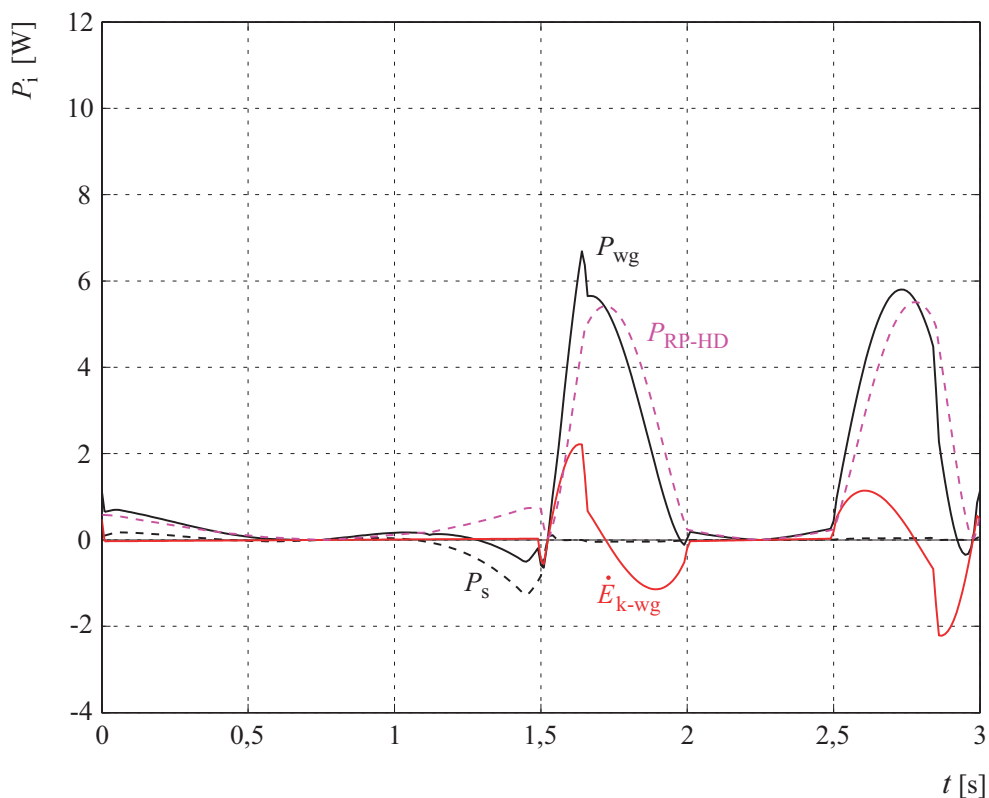


Fig. 9.36. Cas 2, articulació 3: potències que intervenen al reductor HD al llarg d'un cicle

El gràfic de la Figura 9.37 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'accionament de l'articulació 3 en el cas 2. La diferència respecte al cas 1 també es limita al principi de la fase de suport. En aquesta transmissió és més

difícil diferenciar el gràfic d'aquest cas del gràfic del cas 1 (veure la Figura 9.23), doncs les potències involucrades durant la fase de suport, on hi ha les diferències, són molt inferiors que les involucrades durant la fase de transferència.

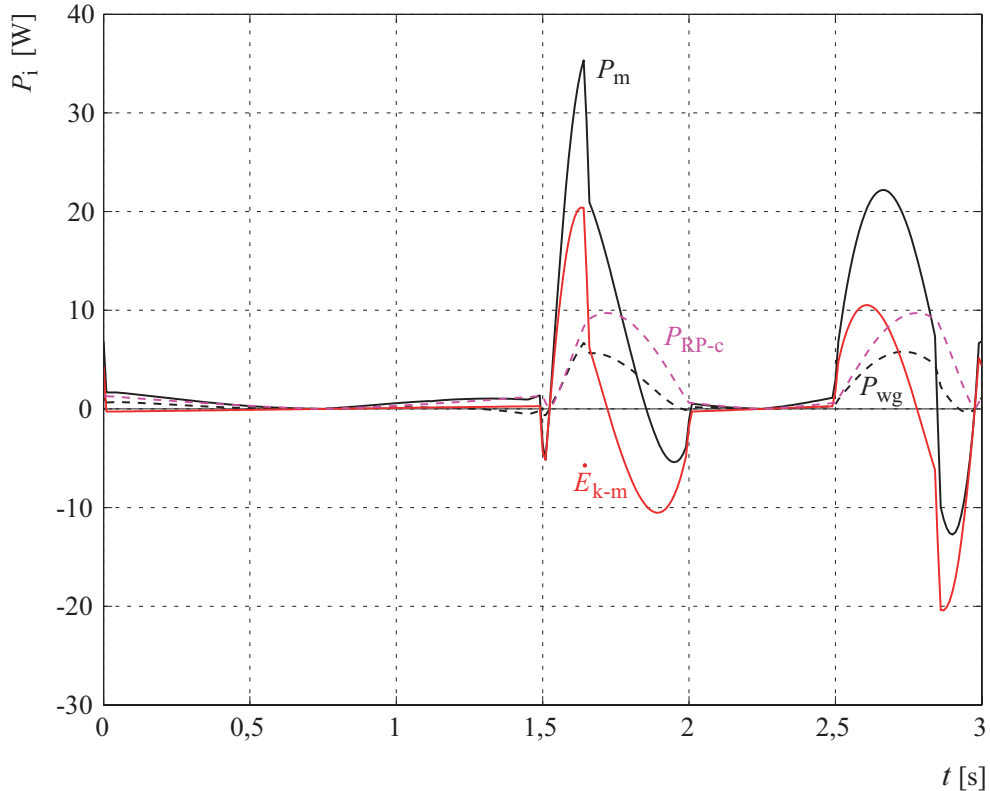


Fig. 9.37. Cas 2, articulació 3: potències que intervien en la transmissió per corretja al llarg d'un cicle

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.38 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle en el cas 2 i per a l'accionament de l'articulació 3. El corrent d'alimentació, I_m , és inferior al del cas 1 al principi de la fase de suport.

El gràfic de la Figura 9.39 mostra l'evolució al llarg del cicle de la potència mecànica proporcionada pel motor, P_m , i de la potència elèctrica que cal subministrar al motor, P_{ele} . Ambdues potències són inferiors al principi de la fase de suport que en el cas 1 (veure la Figura 9.25). Quan la potència mecànica és positiva, la potència elèctrica és només una mica superior, per tant el motor funciona a elevat rendiment.

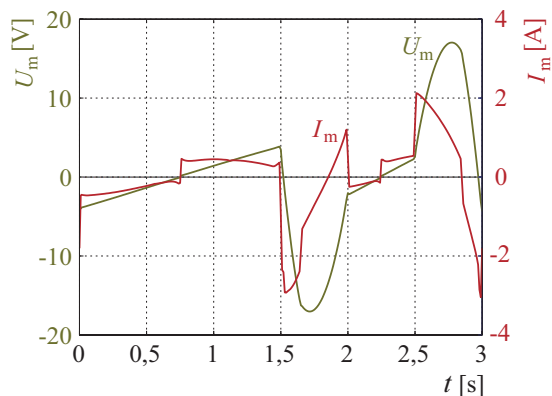


Fig. 9.38. Cas 2, articulació 3: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cicle

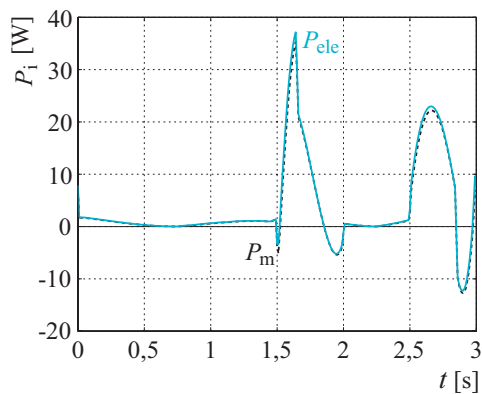


Fig. 9.39. Cas 2, articulació 3: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

9.2.3 Avaluació energètica d'un cicle en el cas 2

Els resultats de les integracions de les corbes de potència en el cas 2 es mostren a la Taula 9.3. La diferència entre $E_s(+)$ i $E_s(-)$ totals en aquest cas és deguda al diferent valor de la força entre el terra i el peu al principi de la fase de transferència –quan el peu es comença a aixecar– i al final d'aquesta –quan el peu entra en contacte amb el terra–. La conseqüència és que en aquesta pota la força que actua sobre el peu fa un treball sobre el sistema positiu al principi i negatiu, però de diferent valor, al final.

Taula 9.3. Energia total per cicle a les diferents articulacions en el cas 2

	articulació 1		articulació 2		articulació 3		Total	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
E_s [J]	0,034	-0,036	1,302	-1,170	0,070	-0,257	1,406	-1,463
E_{wg} [J]	7,840	-0,041	4,231	-0,122	3,531	-0,082	15,60	-0,245
E_m [J]	23,93	-0,836	11,48	-1,481	12,26	-1,851	47,67	-4,168
E_{ele} [J]	24,70	-0,748	13,44	-1,376	12,99	-1,709	51,53	-3,833

A l'articulació 2 es té una lleugera disminució en l'energia mecànica transmesa en sentit directe des dels tres elements de l'accionament: $E_s(+)$, $E_{wg}(+)$, i $E_m(+)$. En l'energia elèctrica subministrada al motor, $E_{ele}(+)$, la disminució respecte al cas 1 és més evident. L'energia mecànica transmesa en sentit invers és una mica inferior a tots els punts. En canvi l'energia elèctrica obtinguda del motor quan aquest funciona com a fre-generador, $E_{ele}(-)$, és superior a la del cas 1.

A l'accionament de l'articulació 3 $E_s(+)$ és molt inferior a la del cas 1, en canvi $E_{wg}(+)$, $E_m(+)$ i $E_{ele}(+)$ només disminueixen lleugerament.

Sumant la despesa energètica en els 3 accionament, en el cas 2 cal subministrar 51,53 J d'energia elèctrica als motors per tal de completar un cicle. Això suposa una diferència de 2,09 J menys o del -3,9 % respecte al cas 1.

9.3 Estudi del cas 3

9.3.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 3

En els casos 1 i 2 la trajectòria del peu es manté en tot moment sobre un pla vertical paral·lel al pla sagital del robot. Això no és estrictament necessari durant la fase de transferència, doncs el peu no està en contacte amb el terra, però implica una important despesa energètica a l'accionament de l'articulació 3, doncs aquesta ha de girar ràpidament durant aquesta fase per corregir la trajectòria del peu.

El cas 3 analitzat en aquest apartat és una alternativa al cas 1, en la que durant la fase de transferència es manté l'articulació 3 fixa. Llavors la trajectòria del peu durant aquesta fase és molt diferent, com es pot apreciar a la Figura 9.40.

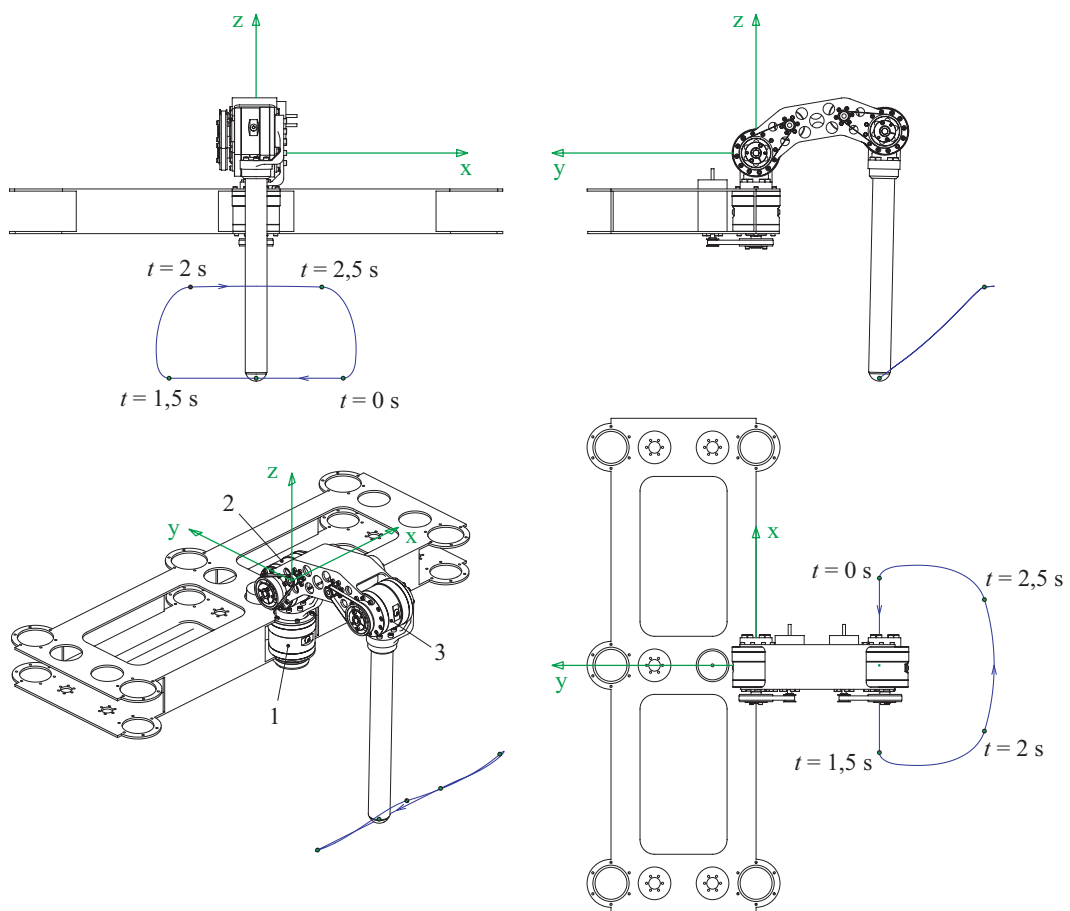


Fig. 9.40. Trajectòria del peu en el cas 3

Com es pot observar a les diferents vistes de la Figura 9.40, la trajectòria del peu respecte al cos en el cas 3 té l'inconvenient de que es necessita més espai lliure als costats laterals del robot, per evitar interferències amb la pota quan aquesta avança respecte al cos.

Els requeriments a les articulacions es mostren a la Figura 9.41. el canvi més important respecte al cas 1 és la velocitat angular de l'articulació 3, ω_3 , durant la fase de transferència.

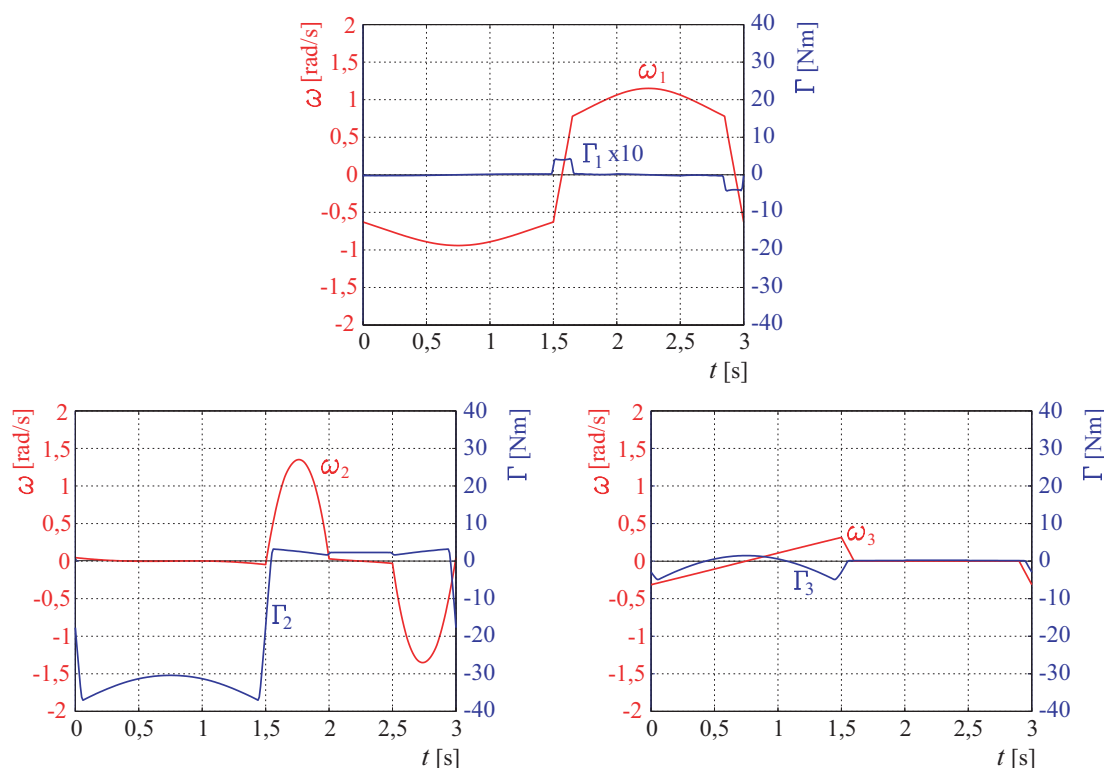


Fig. 9.41. Requeriments a les articulacions de la pota en el cas 3

9.3.2 Simulació dels accionaments en el cas 3

En aquest apartat es presenten només els resultats de la simulació de l'accionament de l'articulació 3, doncs pels accionaments de les articulacions 1 i 2 els resultats són molt similars als del cas 1.

Accionament de l'articulació 3

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.42 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor *HD* de l'accionament de l'articulació 3 en el cas 3. Durant la fase de suport l'evolució de totes les variables és idèntica al cas 1 (veure la Figura 9.22). Durant la fase de transferència l'articulació no gira i per tant totes les potències que intervenen en aquest element són nul·les, i també ho és la potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació de l'arbre d'entrada.

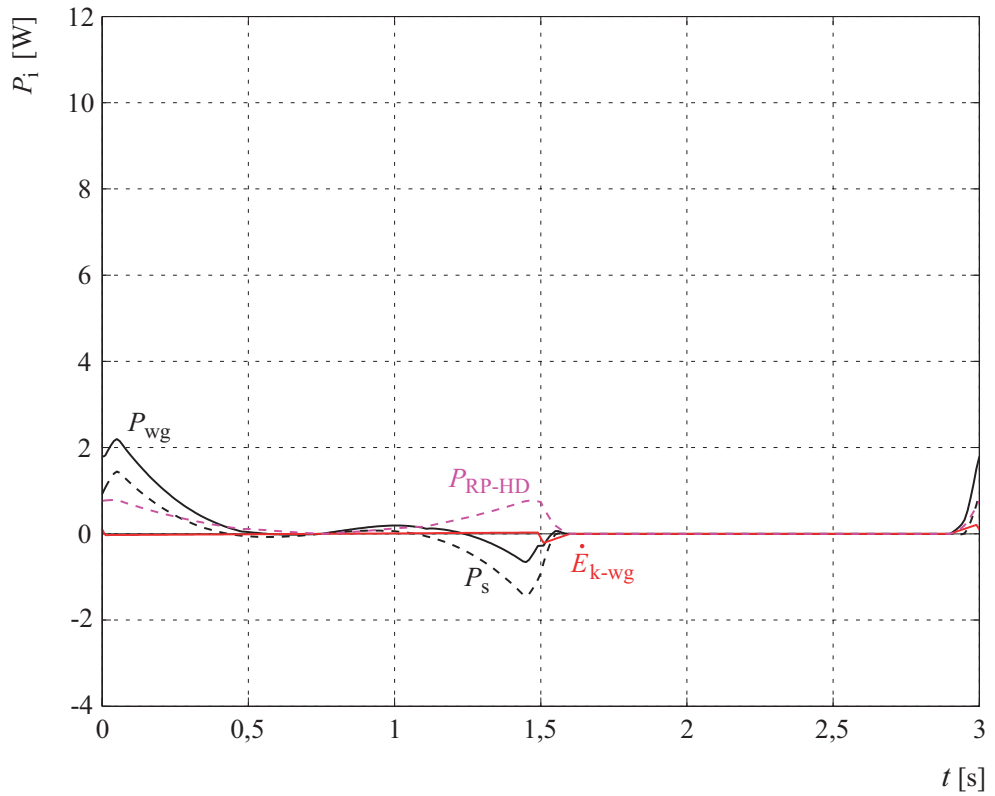


Fig. 9.42. Cas 3, articulació 3: potències que intervien al reductor *HD* al llarg d'un cycle

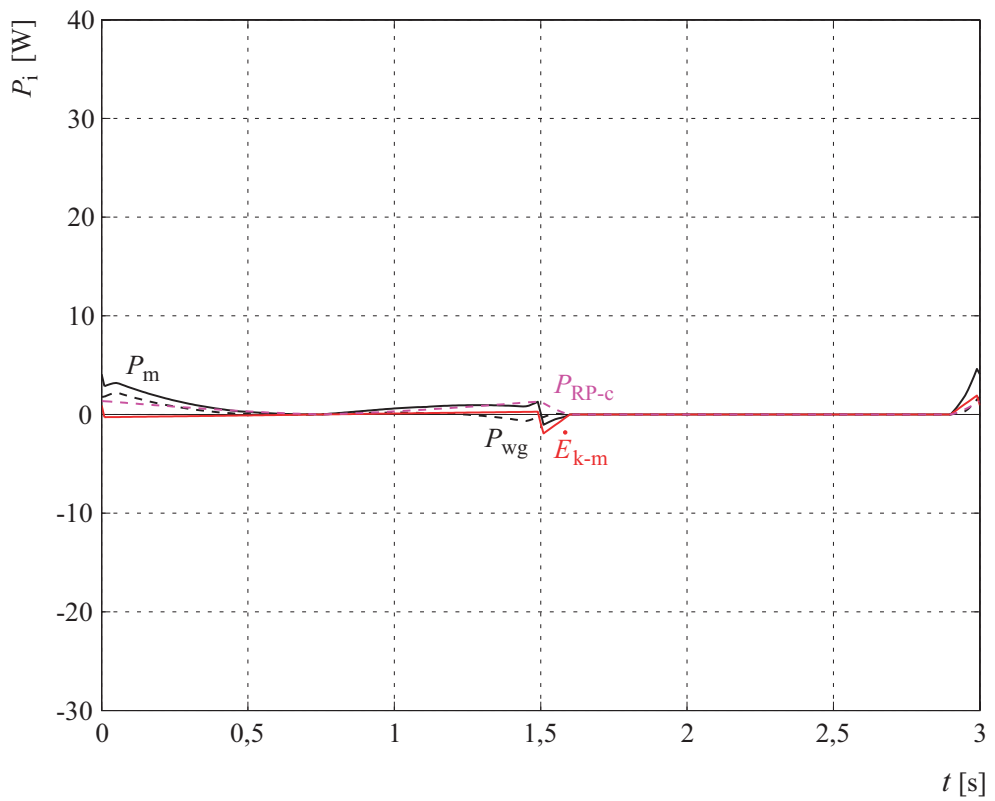


Fig. 9.43. Cas 3, articulació 3: potències que intervien a la transmissió per corretja al llarg d'un cycle

El gràfic de la Figura 9.43 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'accionament de l'articulació 3 en el cas 3. Durant la fase de suport els resultats en aquesta transmissió també són idèntics als del cas 1 (veure la Figura 9.23), i durant la fase de transferència són nul·les les potències i també ho és la potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació.

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.44 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle en el cas 3 i per a l'accionament de l'articulació 3. Durant la fase de suport l'alimentació del motor és idèntica que en el cas 1. Durant la fase de transferència el parell requerit a la sortida de l'accionament per mantenir l'articulació fixa no és nul, però és molt baix. Llavors les resistències passives de la transmissió s'encarreguen de contrarestar aquest petit parell a la sortida. Com a conseqüència el parell demanat al motor és nul i també ho és el corrent elèctric amb el que cal alimentar el motor. Per tant la potència elèctrica subministrada al motor, P_{ele} a la Figura 9.45, també és nul·la durant aquesta fase.

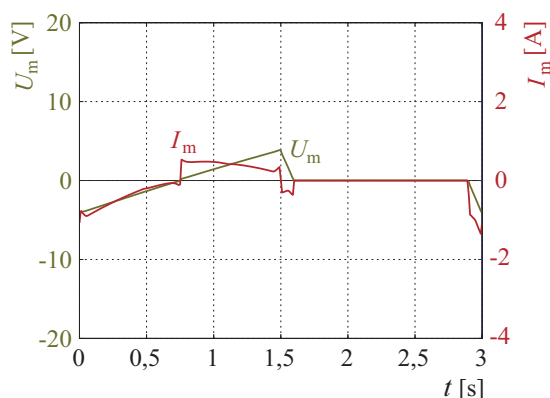


Fig. 9.44. Cas 3, articulació 3: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cicle

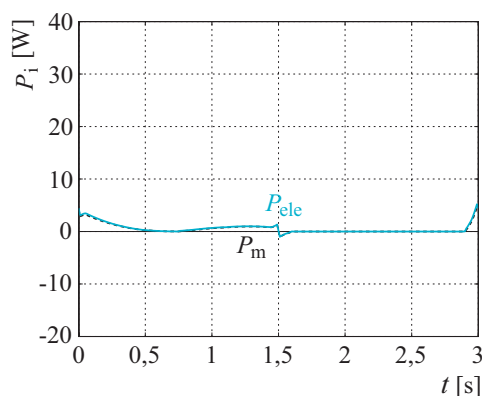


Fig. 9.45. Cas 3, articulació 3: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

9.3.3 Avaluació energètica d'un cicle en el cas 3

Els resultats de les integracions de les corbes de potència pels 3 accionaments en el cas 3 es mostren a la Taula 9.4. A les articulacions 1 i 2 els resultats són molts similars als del cas 1.

Pel que fa referència als elements del 3r accionament, l'energia transmesa en sentit directe a la sortida del reductor, $E_s(+)$, és només una mica inferior a la que es tenia en el cas 1. En canvi l'energia transmesa a la sortida de la transmissió per corretja, $E_{wg}(+)$, i sobretot l'energia mecànica proporcionada pel motor, $E_m(+)$, i l'energia

elèctrica amb la que cal alimentar-lo, $E_{ele}(+)$, són molt inferiors a les corresponents del cas 1. La raó és que, al mantenir l'accionament sense girar durant la fase de transferència, s'estalvia l'energia que en el cas 1 s'utilitzava per accelerar els components interns de l'accionament i també s'evita la dissipació d'energia per part de les resistències passives.

Taula 9.4. Energia total per cicle a les diferents articulacions en el cas 3

	articulació 1		articulació 2		articulació 3		Total	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
E_s [J]	0,038	-0,040	1,44	-1,44	0,308	-0,308	1,786	-1,788
E_{wg} [J]	7,84	-0,039	4,35	-0,315	0,592	-0,093	12,78	-0,447
E_m [J]	23,93	-0,835	11,54	-1,60	1,53	-0,049	37,0	-2,484
E_{ele} [J]	24,70	-0,747	15,64	-1,33	1,66	-0,047	42,0	-2,124

L'energia elèctrica que cal subministrar al motor del 3r accionament per cada cicle és 1,66 J, el que suposa un estalvi de 11,63 J o del 87,5 % respecte al mateix motor en el cas 1.

Analitzant l'energia transmesa en sentit invers, l'energia intercanviada a la sortida del 3r accionament, $E_s(-)$, és molt semblant a la del cas 1, en canvi $E_{wg}(-)$ és inferior i $E_m(-)$ i $E_{ele}(-)$ són molt inferiors.

Per tal de completar un cicle de moviment de tota la pota en el cas 3, cal subministrar en conjunt als tres motors 42 J d'energia elèctrica, el que suposa 11,42 J o un 21,7 % menys que en el cas 1.

9.4 Estudi del cas 4

9.4.1 Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 4

A partir dels resultats del cas 3 s'observa com una possible via per reduir la despesa d'energia dels motors del mecanisme d'una pota és reduir el recorregut angular de les articulacions.

Continuant amb el cas 1 com a referència, una altra possibilitat per aconseguir aquesta reducció és disminuir la cursa vertical del peu durant la fase de transferència. Aquesta alternativa és la que es planteja en el cas 4.

En aquest cas els paràmetres principals que defineixen la llei de moviment del peu respecte al cos es mostren a la Taula 9.5. La trajectòria del peu també es manté al llarg de tot el cicle sobre un pla paral·lel al pla sagital definit per la coordenada transversal $y_C = -170$ mm. La cursa longitudinal del peu respecte al cos, cl , i el

període, T , es mantenen iguals que en el cas 1, de manera que es té la mateixa velocitat d'avanç del robot.

La cursa vertical del peu, c_v , es redueix a una tercera part de la que es té en el cas 1, passant a ser de 25 mm. Aquesta cursa vertical és suficient per caminar per sobre un terra pla i sense obstacles, però no ho seria per caminar per sobre d'un terreny irregular o amb obstacles de superior alçada. El temps dedicat a cada moviment ascendent o descendent del peu passa a ser de 0,25 s, i així les acceleracions màximes a les articulacions 2 i 3 són similars a les que es tenien en el cas 1.

Taula 9.5. Especificacions de la llei de moviment del peu en el cas 4

Cursa longitudinal del peu (c_l)	240 mm
Cursa vertical del peu (c_v)	25 mm
Coordenada transversal del peu (y_C)	-170 mm
Mínima coordenada vertical del peu (z_{Cmin})	-310 mm
Període d'anadura (T)	3 s

A la Figura 9.46 es mostra una vista en perspectiva de la trajectòria del peu respecte al cos del robot i els requeriments, al llarg d'un cicle, que es tenen a les 3 articulacions que formen part del mecanisme de la pota en el cas 4.

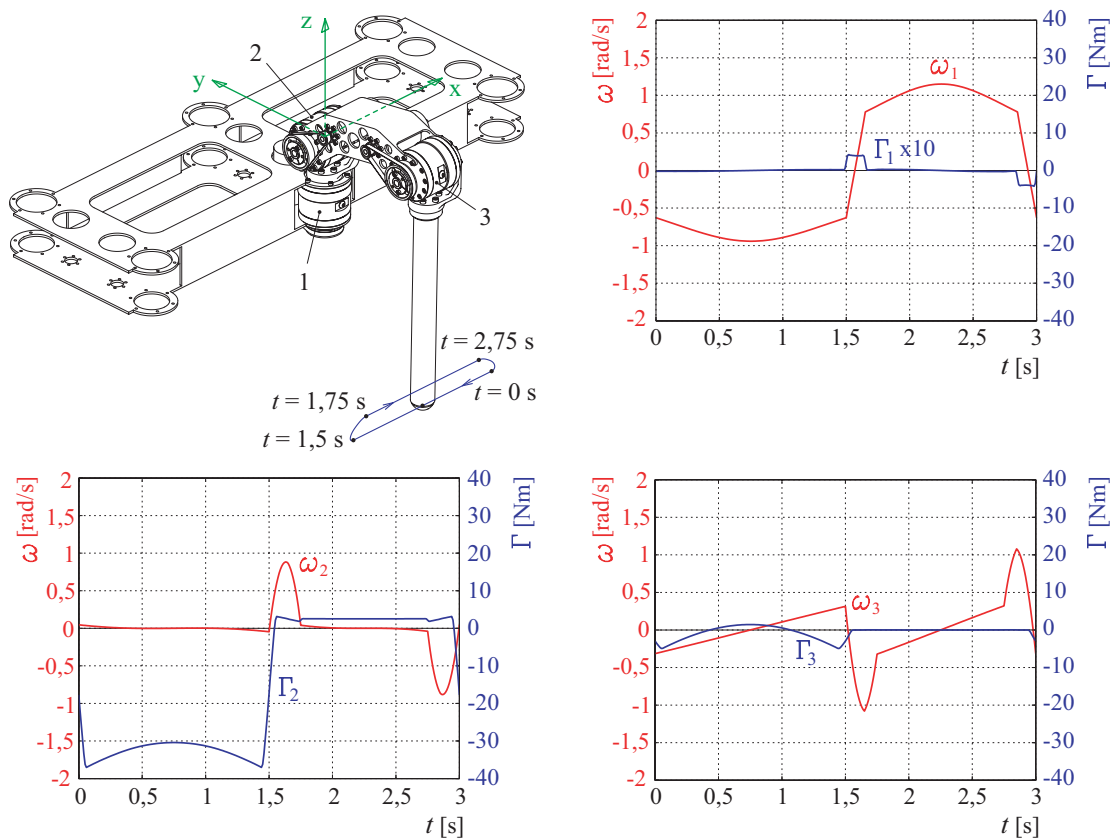


Fig. 9.46. Trajectòria del peu i requeriments a les articulacions en el cas 4

Els requeriments de parell són similars als del cas 1. El moviment de gir de les articulacions 2 i 3 durant les operacions d'aixecar el peu i de baixar-lo, al principi i al final de la fase de transició, tenen una durada inferior i es fan a menor velocitat que en el cas 1. La velocitat angular de l'articulació 1 és igual que en el cas 1 durant la fase de suport i molt semblant durant la fase de transferència.

9.4.2 Simulació dels accionaments en el cas 4

En aquest cas es presenten els resultats de la simulació dels accionaments de les articulacions 2 i 3. Per a l'articulació 1 els resultats són similars als del cas 1.

Accionament de l'articulació 2

Balanç de potències als elements de transmissió

El gràfic de la Figura 9.47 mostra l'evolució de les variables que intervien en el balanç de potència mecànica aplicat al model del reductor *HD* de l'articulació 2 en el cas 4. Respecte al corresponent gràfic del cas 1 (veure la Figura 9.14), les potències transmeses durant les operacions d'aixecar i de baixar el peu són clarament inferiors, i aquestes operacions tenen una durada menor, tal i com ja s'ha comentat al definir la llei de moviment de la pota.

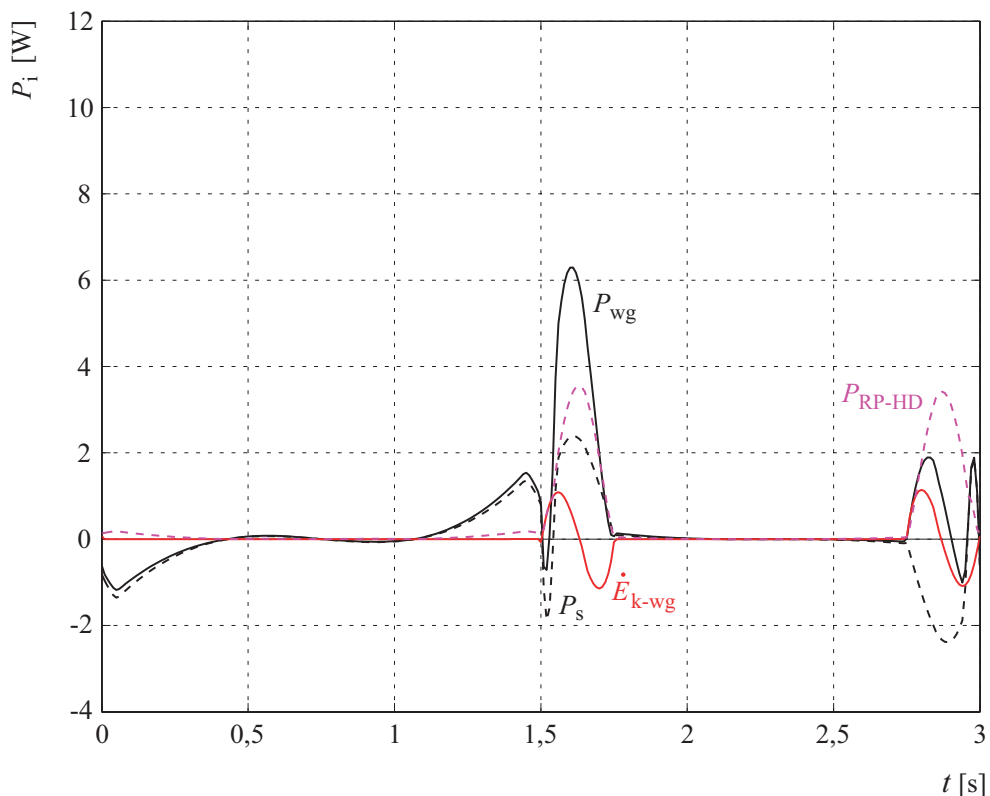


Fig. 9.47. Cas 4, articulació 2: potències que intervien al reductor *HD* al llarg d'un cicle

El gràfic de la Figura 9.48 mostra l'evolució al llarg d'un cicle de les variables que intervenen en el balanç de potència mecànica aplicat al model de la transmissió per corretja dentada de l'accionament de l'articulació 2 en el cas 4. Les potències també són inferiors que en el corresponent gràfic del cas 1 (veure la figura 9.15). En aquest element també s'aprecia que la potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació, \dot{E}_{k-m} , no assoleix valors tan elevats com en el cas 1.

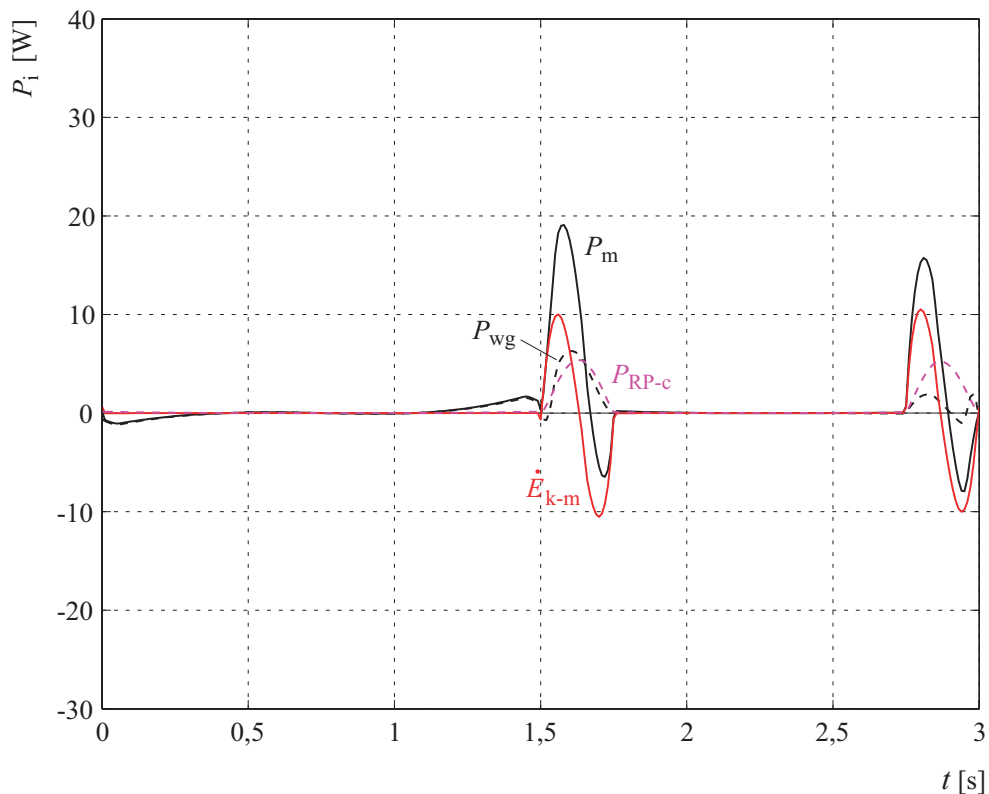


Fig. 9.48. Cas 4, articulació 2: potències que intervenen a la transmissió per corretja

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.49 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle en el cas 4 i per a l'accionament de l'articulació 2. El gràfic de la Figura 9.50 mostra l'evolució al llarg del cicle de la potència mecànica proporcionada pel motor, P_m , i de la potència elèctrica que cal subministrar al motor, P_{ele} . Les principals diferències amb el cas 1 es donen també durant les operacions d'aixecar i de baixar el peu. Els pics positius de P_m i de P_{ele} al principi d'aquestes operacions no arriben a valors tan elevats com en el cas 1.

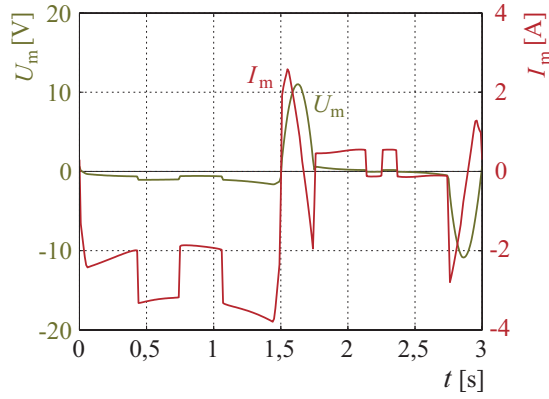


Fig. 9.49. Cas 4, articulació 2: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cycle

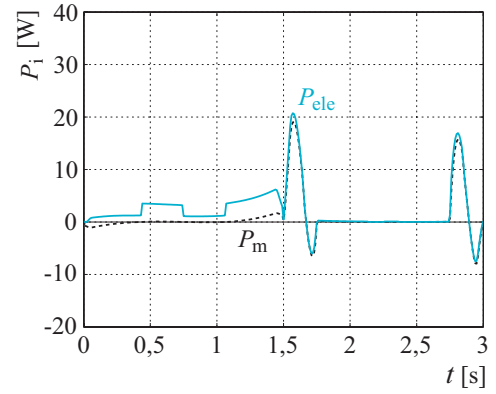


Fig. 9.50. Cas 4, articulació 2: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

Accionament de l'articulació 3

Balanç de potències als elements de transmissió

Els gràfics de les Figures 9.51 i 9.52 mostren l'evolució de les variables que intervien en el balanç de potència mecànica del reductor *HD* i de la transmissió per corretja de l'articulació 3 en el cas 4.

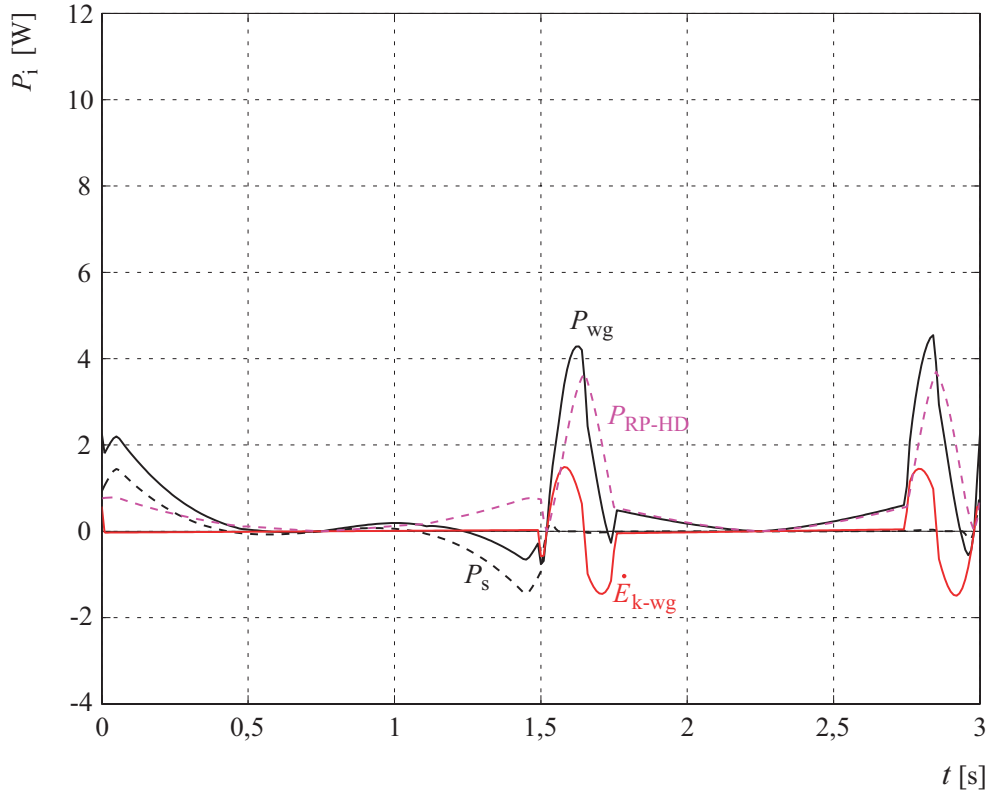


Fig. 9.51. Cas 4, articulació 3: potències que intervien al reductor *HD* al llarg d'un cycle

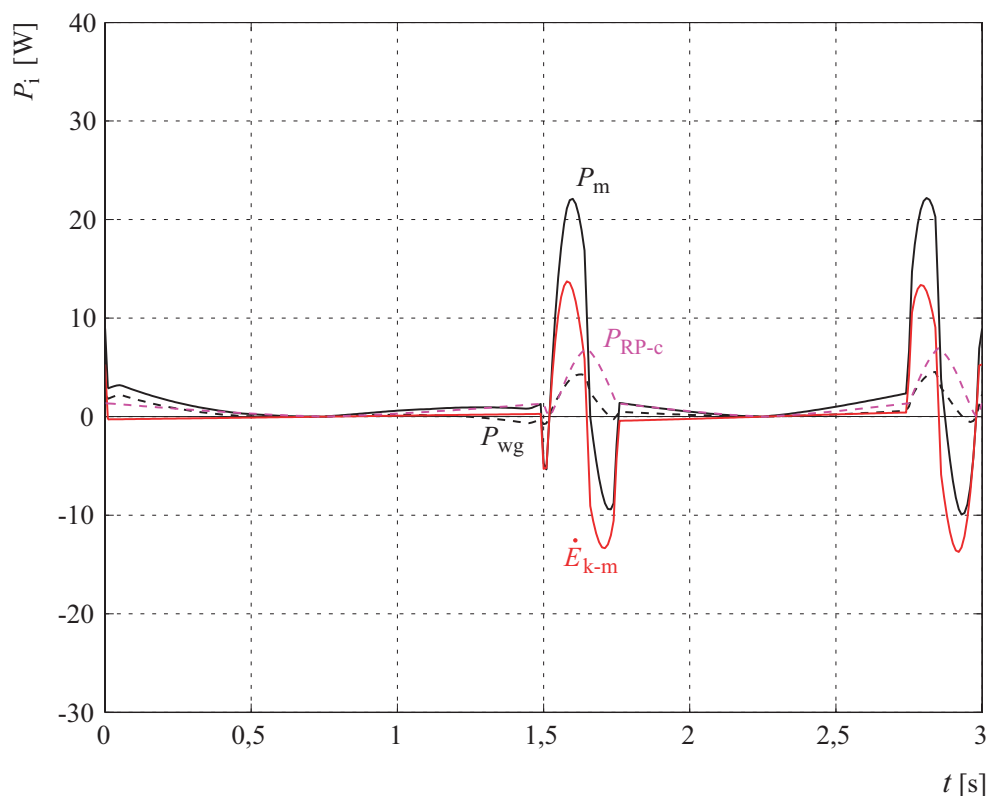


Fig. 9.52. Cas 4, articulació 3: potències que intervien a la transmissió per corretja al llarg d'un cicle

Les diferències respecte al cas 1 també es donen a la fase de transferència, durant les operacions d'aixecar i de baixar el peu. A la transmissió per corretja dentada (veure la Figura 9.52), la potència associada a la variació de l'energia cinètica de rotació, \dot{E}_{k-m} , és inferior al accelerar la transmissió, quan s'inicia el moviment de pujada o de baixada del peu, i superior, en sentit negatiu, quan es frena el moviment de l'articulació, al final de dites operacions.

Simulació del motor elèctric

A la Figura 9.53 es representen les variables d'alimentació del motor al llarg del cicle en el cas 4 i per a l'accionament de l'articulació 3. El gràfic de la Figura 9.54 mostra l'evolució al llarg del cicle de la potència mecànica proporcionada pel motor, P_m , i de la potència elèctrica que cal subministrar al motor, P_{ele} .

Els pics de corrent durant les operacions d'aixecar i de baixar el peu arriben a valors lleugerament superiors que en el cas 1, però la tensió d'alimentació es queda en valors inferiors, al ser inferior la velocitat de gir de l'articulació.

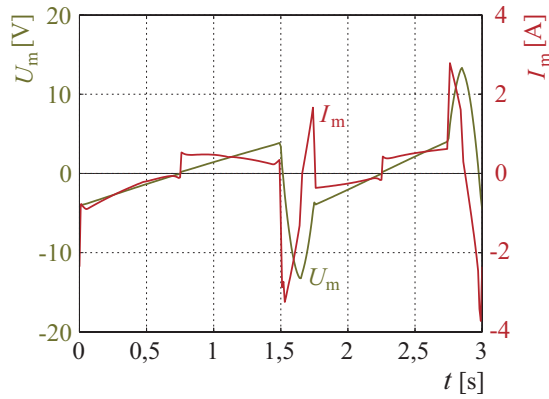


Fig. 9.53. Cas 4, articulació 3: alimentació elèctrica del motor al llarg d'un cycle

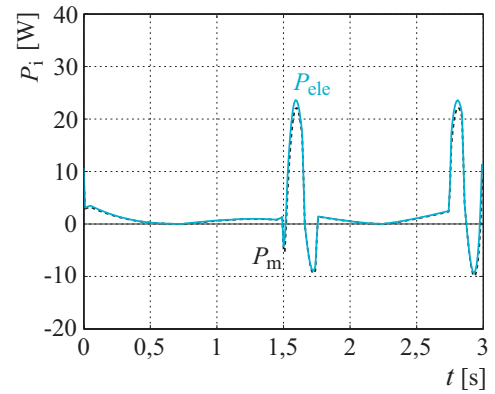


Fig. 9.54. Cas 4, articulació 3: potència d'alimentació elèctrica i potència mecànica que proporciona el motor

9.4.3 Avaluació energètica d'un cycle en el cas 4

Els resultats de les integracions de les corbes de potència en el cas 4 es mostren a la Taula 9.6. A l'articulació 1 només hi ha una lleugera diferència respecte al cas 1 en l'energia involucrada a la sortida de l'accionament, $E_s(+)$ i $E_s(-)$. En els altres punts de l'accionament els resultats són idèntics.

Taula 9.6. Energia total per cycle a les diferents articulacions en el cas 4

	articulació 1		articulació 2		articulació 3		Total	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
E_s [J]	0,040	-0,042	0,678	-0,678	0,305	-0,305	1,023	-1,025
E_{wg} [J]	7,84	-0,041	1,38	-0,289	1,78	-0,119	11,0	-0,449
E_m [J]	23,93	-0,836	3,81	-1,03	6,49	-1,40	34,23	-3,266
E_{ele} [J]	24,70	-0,748	7,66	-0,763	7,13	-1,28	39,49	-2,791

A les articulacions 2 i 3, el menor recorregut angular es tradueix en una reducció de l'energia involucrada. Això passa en tots els punts avaluats quan l'energia es transmet en sentit directe, i en la majoria de punts quan l'energia es transmet en sentit invers.

A l'articulació 2 l'energia elèctrica necessària per alimentar el motor elèctric és de 7,66 J, el que suposa 7,96 J o un 51 % menys que en el cas 1. A l'articulació 3 l'energia elèctrica requerida és de 7,13 J, amb una reducció de 6,16 J o del 46,4 % respecte al cas 1.

Per tal de completar un cycle de moviment de tota la pota en el cas 4, es necessiten en conjunt 39,49 J d'energia elèctrica, el que suposa 14,13 J o un 26,4 % menys que en el cas 1.