



Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Tesi di laurea

Ambiente virtuale per lo sviluppo di motocicli ibridi

Relatore: Alessandro Beghi
Correlatore: Fabio Maran

Laureando: Andrea De Simoi

17 ottobre 2011

Sommario

Due dei campi di ricerca più importanti degli ultimi anni sono stati i sistemi di trasporto e l'uso efficiente delle risorse energetiche, con l'obiettivo di ridurre il loro impatto economico ed ambientale. In quest'ottica i veicoli ibridi hanno ricevuto crescente attenzione, evidenziata dalla diffusione di numerosi modelli di auto ibride. Questo trend non viene tuttavia rispettato dagli scooter e dalle motociclette, nonostante le loro prestazioni siano promettenti dal punto di vista dei consumi e della mobilità, in particolare in ambienti urbani: ciò è dovuto alla limitatezza dello spazio disponibile per la macchina elettrica e del pacco batterie, che pertanto offre un'autonomia limitata. Questo problema risulta ancor più evidente nel caso delle motociclette, in quanto si devono considerare le esigenze dei piloti che solitamente ricercano delle buone sensazioni e il divertimento alla guida.

Questa tesi si inserisce in un progetto della casa motociclistica *Aprilia* per l'elettrificazione di una motocicletta, realizzando un ambiente di virtual prototyping che permette lo sviluppo di strategie di controllo e di gestione efficiente dell'energia (*power management system*). In particolare è stato realizzato un ambiente simulativo dinamico, contenente una specifica modellazione del motore ibrido e della batteria, che permette la valutazione delle strategie in tempo reale. La tesi è strutturata in sei capitoli nei quali viene presentato un breve riepilogo del contesto di ricerca (capitolo 1), lo stato attuale del progetto (capitolo 2), lo studio e la realizzazione di un modello della batteria (capitolo 3), l'ambiente di virtual prototyping dinamico realizzato (capitolo 5), lo studio e la realizzazione di un *power management system* (PMS) ed infine i risultati complessivi e le proposte per ulteriori sviluppi futuri (capitolo 6).

Autore: Andrea De Simoi

Indice

Sommario	I
1 Introduzione	1
1.1 Generalità sui veicoli ibridi elettrici	4
1.1.1 Series Hybrid	5
1.1.2 Parallel Hybrid	6
1.1.3 Series - Parallel Hybrid	9
2 Stato attuale	11
2.1 Dati disponibili	11
2.1.1 Motociclo: Aprilia RS4 125	11
2.1.2 Batteria	15
2.1.3 Il prototipo	19
2.2 Software disponibile: Simulazione statica	23
2.2.1 Inizializzazione dei dati	24
2.2.2 Calcolo ed elaborazione degli intervalli di boost	26
2.2.3 Calcolo ed elaborazione degli intervalli di carica	27
2.2.4 Computo energetico	29
2.2.5 Visualizzazione dei dati	29
2.3 Considerazioni ed obiettivi	30
3 Modellazione della batteria	33
3.1 Modelli elettrici	35
3.2 Modello realizzato	41
3.2.1 Analisi dei requisiti	41
3.2.2 Descrizione del modello	42

3.3	Introduzione del modello	45
3.3.1	Stima della potenza di carica	48
3.3.2	Implementazione	49
3.4	Risultati	51
4	Simulazione dinamica	59
4.1	VI-BikeRealTime	59
4.2	Analisi requisiti	60
4.3	Sviluppo del modello Simulink	62
4.3.1	Fasi di sviluppo e milestone	62
4.3.2	Considerazioni	69
4.4	Motore ibrido	71
4.4.1	Accoppiamento dei motori	71
4.4.2	Gestione della batteria	73
4.5	Interfaccia grafica	78
4.5.1	Settaggio della simulazione	78
4.5.2	Cruscotto	80
4.6	Risultati	80
5	Gestione ottima dell'energia	85
5.1	Strategie real time	86
5.2	Torque split adattivo	88
5.2.1	Modellazione del sistema	89
5.2.2	Funzione di obiettivo	89
5.2.3	Ottimizzazione	90
5.2.4	Risultati	92
6	Conclusioni e sviluppi futuri	95
7	Ringraziamenti	97
8	Appendice A	99
8.1	Funzioni di preelaborazione	99
8.1.1	getChargePol	99
8.1.2	getDischargePol	101
8.1.3	getPowerPol	102
8.2	Funzioni di calcolo	103
8.2.1	getChargeVoltage	103
8.2.2	getChargeCurrent	104
8.2.3	getDischargeVoltage	104
8.2.4	getTimePower	104

8.2.5	getPower	105
8.2.6	getTimePowerI	105
8.2.7	getPowerI	105

Bibliografia	106
---------------------	------------

Negli ultimi anni, una delle problematiche più importanti a livello mondiale è stata la crescente richiesta energetica, dovuta in particolare al rapido progresso delle economie emergenti (Figura 1.1). La maggior parte degli stati mondiali si è quindi interrogata sull'impatto economico ed ambientale di tale crescita, rilevando la necessità di porre degli obiettivi di sostenibilità e riduzione delle emissioni inquinanti.

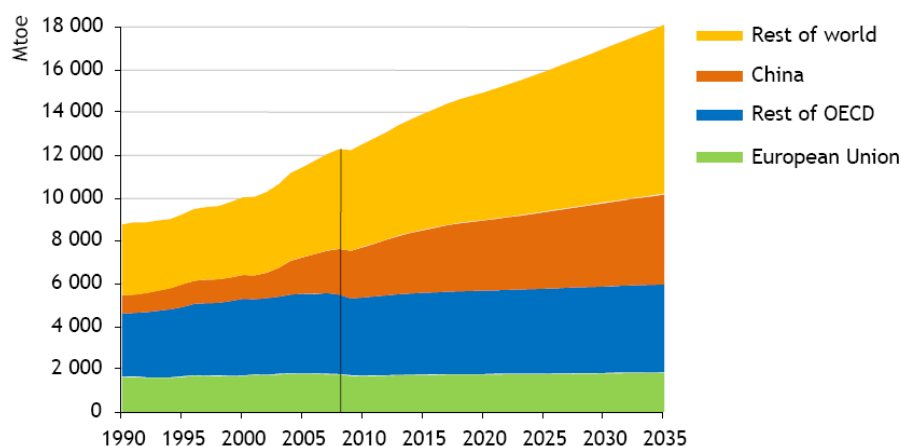


Figura 1.1: Richiesta energetica mondiale (IEA World Energy Outlook 2010).

Osservando il contesto europeo [1], a fronte di stabilizzazione della richiesta energetica, attualmente esaudita prevalentemente mediante i carburanti fossili (circa 80%), emerge tuttavia un leggero mutamento nella ripartizione delle fonti (Figura 1.2), con una previsione di riduzione (circa il 10%) dell' utilizzo dei carburanti fossili, che rimarranno comunque prevalenti, ed un incremento delle energie alternative entro il 2030.

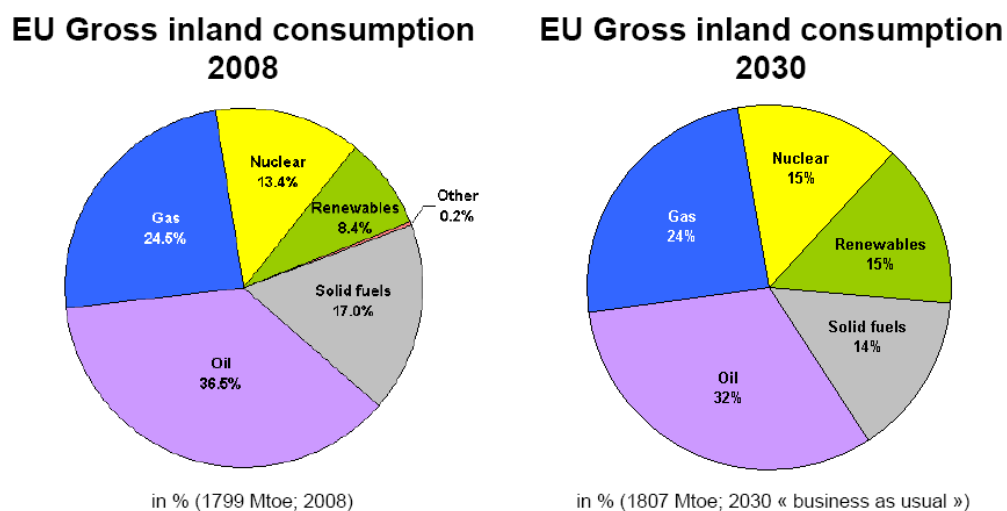


Figura 1.2: Ripartizione delle fonti energetiche europea (Eurostat 2010).

Per garantire la sostenibilità, la competitività e una maggiore sicurezza nella fornitura dell'energia, l'unione europea ha studiato delle accurate politiche energetiche, il famoso *20-20-20*, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas inquinanti, il consumo energetico e di incrementare la diffusione delle rinnovabili del 20% entro il 2020 (Figura 1.3).

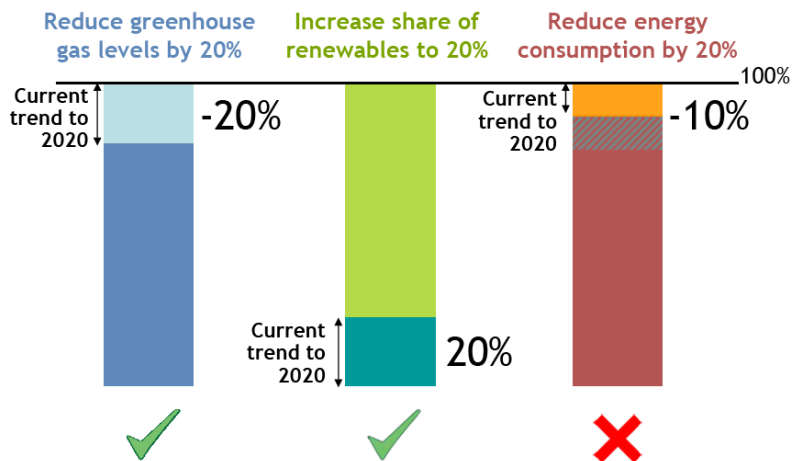


Figura 1.3: Obiettivi energetici europei (20-20-20).

Osservando i trend attuali si nota tuttavia che il secondo dei punti elencati non potrà essere rispettato, ponendo ulteriormente l'accento sulla necessità di ridurre il consumo dei carburanti derivati dal petrolio, prevalentemente importati da paesi extraeuropei, ottenendo dei benefici dal punto di

vista economico, dell'indipendenza energetica e dell' impatto ambientale. Analizzando la distribuzione dei consumi, emerge che essi sono imputabili principalmente alle industrie, ai trasporti e alle abitazioni (Figura 1.4), settori sui quali sarà quindi necessario operare per il raggiungimento degli obiettivi stabiliti.

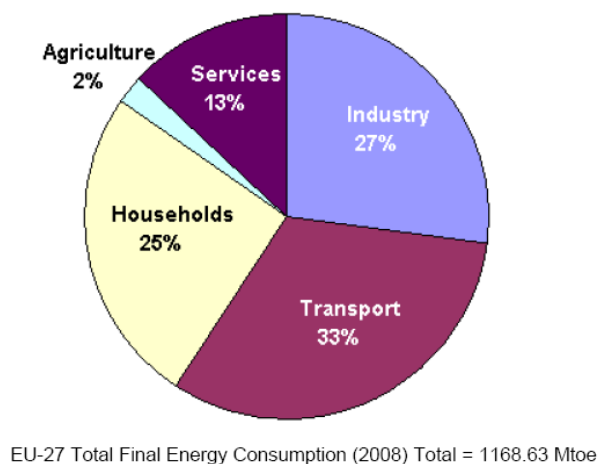


Figura 1.4: Ripartizione del consumo energetico europeo (Eurostat 2010).

In particolare, le prospettive di miglioramento dell'efficienza energetica e del ritorno economico nella tecnologia necessaria (Figura 1.5), indicano come le principali aree di intervento siano quella delle abitazioni (accelerando il rinnovamento strutturale degli edifici) e quella dei trasporti (riducendo il loro consumo energetico).

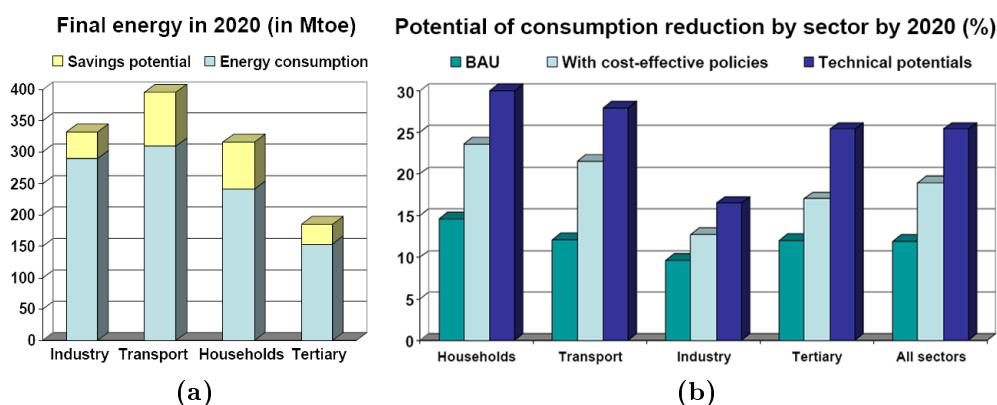


Figura 1.5: (a) Potenzialità di miglioramento dell'efficienza energetica e (b) ritorno economico nella tecnologia disponibile (Unione europea).

In quest'ottica i veicoli ibridi, in particolar modo quelli elettrici, hanno acquisito sempre maggiore rilevanza a livello europeo (*the green cars initiative*) e mondiale (*WP2010* e *WP2011*), divenendo quindi uno dei principali ambiti di ricerca internazionale. Negli ultimi anni si è quindi assistito allo sviluppo e alla commercializzazione di numerose automobili ibride elettriche, la più nota delle quali è la Toyota Prius. Poco si è mosso nell'ambito degli scooter e delle motociclette, nonostante garantiscano limitati consumi ed elevata mobilità in particolar modo in ambiente urbano. Ciò è dovuto alla bassa autonomia della batteria, principale problema dei veicoli ibridi, che nel caso delle due ruote è accentuato dal limitato spazio disponibile per l'inserimento del pacco batterie e delle altre componenti elettriche. Nel caso delle motociclette queste problematiche sono ulteriormente accresciute dalle esigenze dei loro utilizzatori, che ricercano buone sensazioni e divertimento nella loro guida. I sistemi di gestione dell'energia (*Power Management System*) risultano quindi fondamentali per il raggiungimento di queste necessità e della massima autonomia delle batterie.

L'obiettivo di questa tesi è quello di ampliare gli studi dell'azienda motociclistica *Aprilia* nell'ambito dell'elettrificazione di una motocicletta di serie, realizzando un ambiente di virtual prototyping che permetta di validare il dimensionamento del pacco batterie e di sviluppare strategie di controllo e power management system (*PMS*) efficienti orientati al miglioramento delle prestazioni mediante effetto *boost*. Nello specifico, estendendo le funzionalità del toolbox Vi-Bike real time con una modellazione specifica ed altamente personalizzabile del motore ibrido e della batteria, è stato realizzato un ambiente simulativo dinamico sul quale sono state testate alcune strategie di controllo per il prototipo da realizzare. Ciò ha evidenziato la possibilità di testare semplicemente le diverse soluzioni con diverse tipologie di guida e di tracciato, mantenendo un basso sforzo computazionale. Il simulatore è stato completato con un'interfaccia grafica che permette la visualizzazione dei principali dati di interesse in real time, consentendo di configurare e variare i principali parametri in tempo reale, come ad esempio la mappatura del boost.

1.1 Generalità sui veicoli ibridi elettrici

In generale, un veicolo ibrido accoppia due sistemi di propulsione differenti, che vengono fatti coesistere principalmente per migliorare le prestazioni e ridurre le emissioni. Sebbene siano state studiate svariate tipologie, quella più diffusa è quella dell'ibrido elettrico, che accoppia un motore endoter-

mico ad una macchina elettrica alimentata dall'energia immagazzinata in appositi sistemi di accumulo. A seconda dell'architettura implementata, i veicoli ibridi elettrici vengono suddivisi in tre principali categorie: series hybrid, parallel hybrid e series-parallel hybrid [2, 3, 4, 5].

1.1.1 Series Hybrid

I veicoli ibridi elettrici (*HEV*) di tipo *serie*, o *range extended vehicle (REV)*, sfruttano un motore endotermico per generare l'energia necessaria a ricaricare le batterie e ad alimentare la macchina elettrica che fornisce tutta la potenza motrice (Figura 1.6). Non essendo la fonte di trazione, il motore a combustione interna (*ICE*) viene fatto operare attorno al punto di massima efficienza in ogni condizione di guida, avviandolo nel caso in cui lo stato di carica della batteria raggiunga il minimo stabilito e spegnendolo al raggiungimento del livello di carica massimo, mantenendolo in un range solitamente compreso tra il 65% e il 75%.

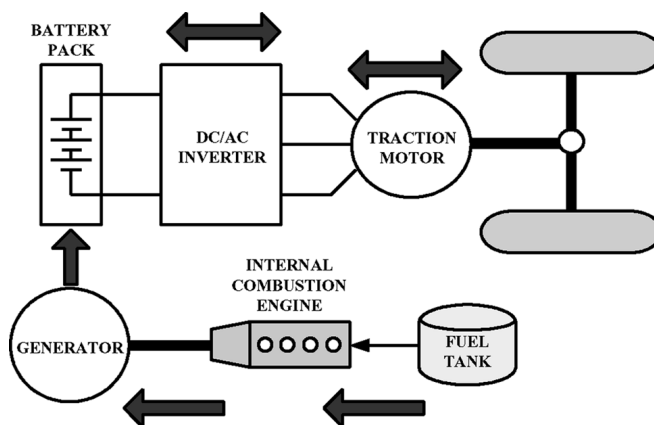


Figura 1.6: Schema dell'architettura ibrida serie (series hybrid).

Osservando lo schema architettrale si nota come non ci sia una connessione meccanica tra il motore a combustione interna e le ruote: in questo modo esso può operare nelle migliori condizioni di velocità e coppia limitando i consumi di carburanti e incrementando l'efficienza. Il punto debole di questa tipologia di veicoli ibridi è la presenza di due conversioni energetiche, motore endotermico \rightarrow generatore e generatore \rightarrow motore elettrico, che creano delle *dissipazioni*. Un ulteriore svantaggio è la necessità di dimensionare entrambe le macchine elettriche (generatore e motore) rispetto alla massima potenza del veicolo che, come nel caso delle automobili, è richiesta solamente in alcune circostanze. Nell'uso cittadino le componenti elettriche potrebbero infatti essere notevolmente sottodimensionate

rispetto ad un utilizzo generico, rendendo pertanto il dimensionamento molto difficoltoso ed il veicolo complessivamente molto costoso. Questa architettura può essere molto utile in tutti quei contesti in cui le condizioni di guida sono chiaramente definite, come ad esempio l'ambito urbano, o in mezzi le cui dimensioni consentono il posizionamento delle macchine elettriche che, fungendo da unica fonte di trazione, risultano essere molto voluminose (locomotive, autobus, mezzi pesanti, ecc.).

1.1.2 Parallel Hybrid

I veicoli ibridi elettrici in configurazione *parallela* sono dotati del motore a combustione interna e di una macchina elettrica, entrambi collegati alla trasmissione, che possono funzionare contemporaneamente o singolarmente in base alle condizioni di guida (Figura 1.7). Solitamente nella guida a basse velocità, come ad esempio in città, viene utilizzato il motore elettrico che garantisce un'efficienza maggiore, mentre alle alte velocità viene privilegiato l'utilizzo del motore endotermico, utilizzando la macchina elettrica come generatore per ricaricare le batterie o come propulsore; quest'ultima permette inoltre di effettuare la frenata rigenerativa, recuperando l'energia per ricaricare gli accumulatori.

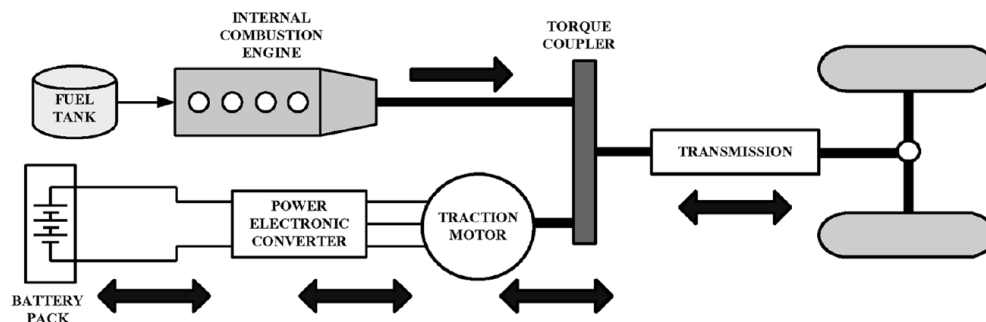


Figura 1.7: Schema dell'architettura ibrida parallelo (parallel hybrid).

Per migliorare l'efficienza, i veicoli ibridi di tipo parallelo vengono spesso dotati di *trasmissioni a variazione continua (CVT)*, che permettono di ottimizzare il punto di lavoro del motore endotermico per ogni possibile richiesta di coppia. Variando in maniera continua il rapporto di trasmissione, esse permettono di migliorare l'efficienza nell'utilizzo del carburante e conseguentemente i consumi. I principali vantaggi della configurazione parallela rispetto alla precedente architettura sono la presenza di una sola conversione energetica che permette di ridurre le dissipazioni e l'utilizzo di una sola macchina elettrica di dimensioni ridotte, che permette di ridurre i

costi e lo spazio necessario al suo posizionamento. In questa architettura, non essendo la principale fonte di trazione, il motore elettrico viene dimensionato per fornire una potenza inferiore a quella massima del veicolo, rispetto alla quale si distinguono tre ulteriori categorie di veicoli:

- *micro hybrid*: sono dotati di un macchina elettrica di limitata potenza e a bassa tensione ($V < 60V$ e $P < 5kW$) che viene sostituita all'alternatore, mentre la propulsione viene garantita dal motore endotermico (Figura 1.8). In questo caso il motore elettrico viene utilizzato per la realizzazione del sistema di *start and stop*, che spegne il motore quando non viene utilizzato, come ad esempio ai semafori, consentendo un risparmio di carburante compreso tra il 2% e il 10% nel ciclo urbano. La macchina elettrica consente inoltre un avviamento silenzioso rispetto ai normali avviatori, il riavvio veloce in caso di non completo spegnimento del motore endotermico, ed una limitata frenata rigenerativa, essendo essa collegata all'albero motore mediante cinghie (*Belted Alternator Starter - BAS*).

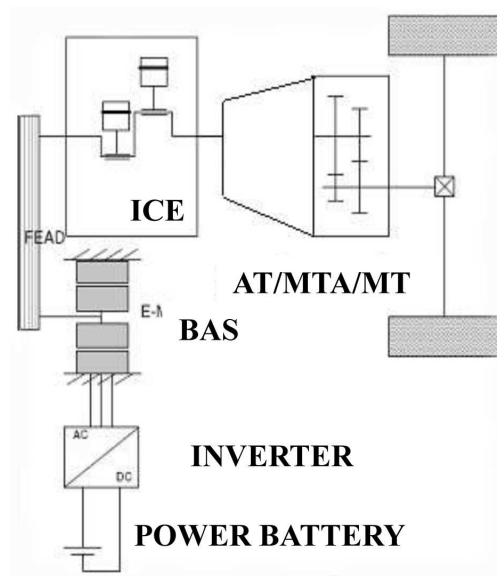


Figura 1.8: Schema dell'architettura micro hybrid BAS.

- *Mild Hybrid*: sono un'evoluzione dei veicoli di tipo micro ibrido e, sfruttando dispositivi a media tensione e potenza ($V > 100 \div 200V$ e $P > 10 \div 20kW$), permettono di realizzare l'effetto boost utilizzando la macchina elettrica per fornire una coppia aggiuntiva al motore a combustione interna in fase di accelerazione o in frenata. Questa

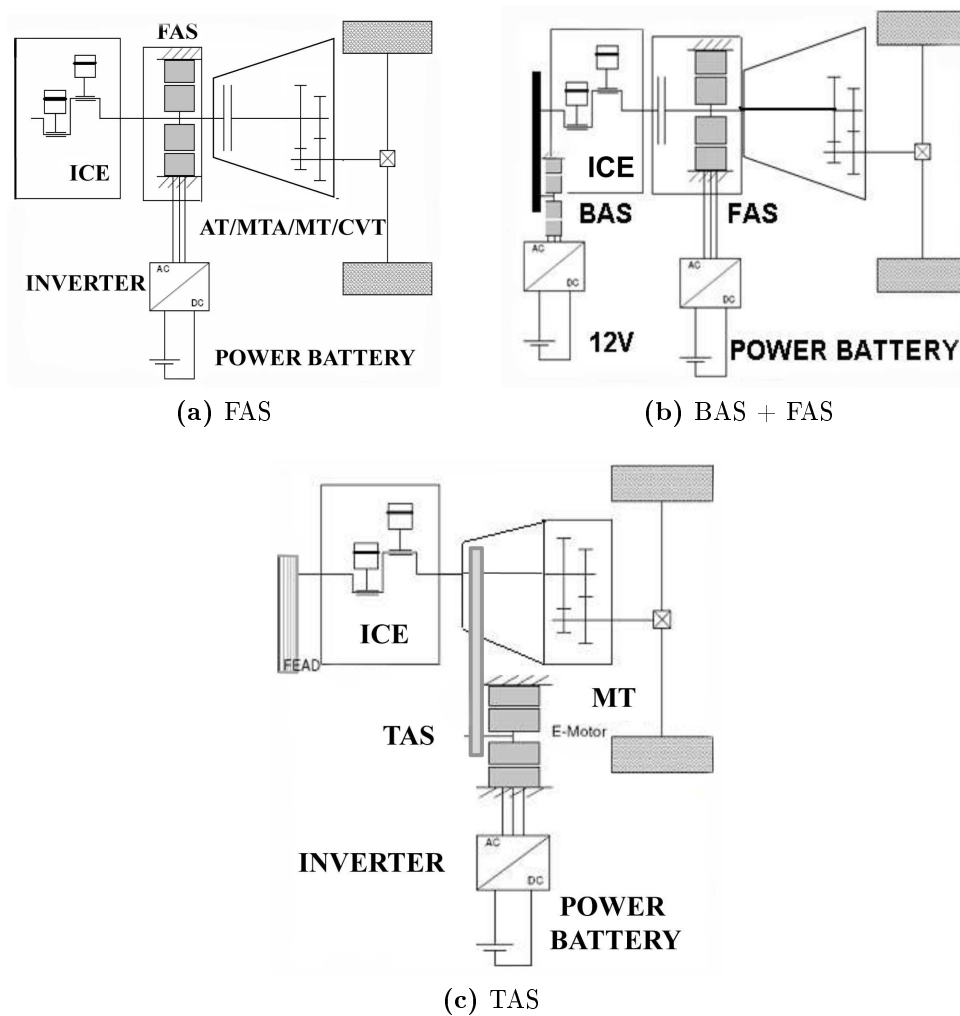


Figura 1.9: Schemi architetturali per soluzioni mild hybrid.

tipologia di veicoli permette inoltre di potenziare la frenata rigenerativa e, in alcuni casi, il funzionamento del veicolo in modalità elettrica a basse velocità e carichi, con il successivo subentro del motore endotermico, consentendo un risparmio di carburante compreso tra il 10% e il 20% nel ciclo urbano. In base alla modalità di collegamento e al posizionamento del motore elettrico si distinguono tre principali architetture (Figura 1.9).

La prima, detta *Flywheel Alternator Starter (FAS)*, accoppia il motore elettrico ad un volano inserendoli fra scatola del cambio e motore endotermico (Figura 1.9a) con un ingombro longitudinale molto contenuto (50 – 80mm). La seconda combina la precedente con l'ar-

chitettura BAS (Figura 1.9b) e permette la gestione dello start and stop e la guida (limitata) in modalità elettrica, utilizzando la macchina elettrica aggiuntiva per l'accensione del motore endotermico. Queste due architetture sfruttano infatti la frizione per svincolare il motore elettrico dal motore endotermico, eliminandone l'inerzia nei frangenti in cui la trazione è fornita dal motore elettrico. La terza architettura, *transmission alternator starter (TAS)*, accoppia il motore elettrico (avente una potenza solitamente superiore ai $30kW$) alla trasmissione (Figura 1.9c) potendo sfruttare i vari rapporti per aumentare la coppia erogata dalla macchina elettrica che, a causa del limitato spazio a disposizione, è contenuta rispetto alle precedenti.

- *Full Hybrid*: sono veicoli dotati di dispositivi elettrici ad alta tensione e potenza ($V > 300V$ e $P > 50kW$) in grado di fornire la potenza necessaria alla propulsione del veicolo. In questo modo esso può viaggiare in modalità puramente elettrica (*zero emission vehicle*) limitata dalla capacità delle batterie, con il solo motore a combustione interna o combinando i due propulsori secondo le modalità stabilite dall'architettura di riferimento. Questa particolare tipologia di veicoli è realizzabile infatti con le configurazioni serie, parallelo e serie-parallelo, garantendo un risparmio di carburante compreso tra il 20% e il 50% nel ciclo urbano.

1.1.3 Series - Parallel Hybrid

I veicoli ibridi elettrici di tipo *serie-parallelo* sono una combinazione delle due architetture precedenti ottenuta utilizzando una particolare trasmissione che aggiunge un collegamento meccanico tra il generatore e il motore elettrico, rispetto alla configurazione serie, e un generatore, rispetto alla configurazione parallela (Figura 1.6).

La particolare trasmissione utilizzata, detta planetaria (Figura 1.11), permette di disaccoppiare la velocità del veicolo (Ω_R) da quella della macchina elettrica (Ω_S) e del motore endotermico (Ω_C), che può essere quindi utilizzato per effettuare contemporaneamente la propulsione del veicolo e la ricarica delle batterie (power split) nel caso in cui Ω_S sia negativa o l'ottimizzazione del punto di lavoro della motore a combustione interna ($\Omega_S > 0$), diminuendone conseguentemente i consumi. In aggiunta, sfruttando un particolare sistema di blocco, è possibile disabilitare la macchina elettrica ottenendo una configurazione di tipo parallelo, oppure, assorbendo tutta la coppia del motore endotermico, operare in modalità serie. Come intuibile la crescente complessità architetture necessita di sofisticati siste-

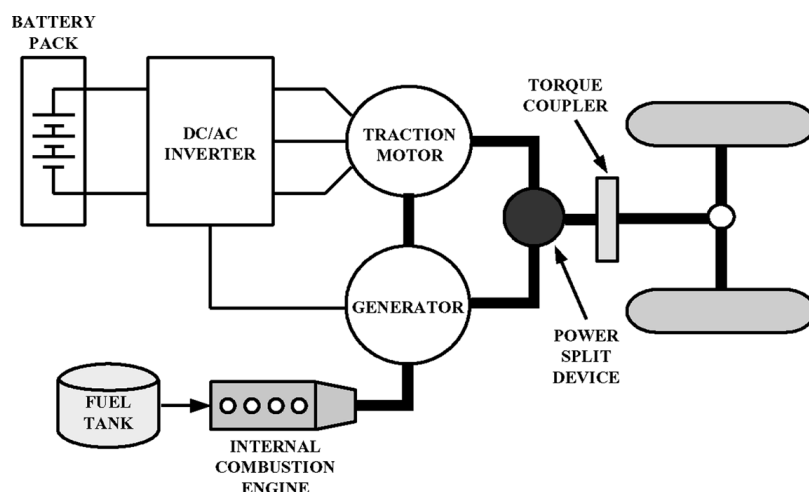


Figura 1.10: Schema dell'architettura ibrida serie-parallelo (series-parallel hybrid).

mi di controllo, rendendo questa tipologia di veicoli notevolmente costosa rispetto alle precedenti.

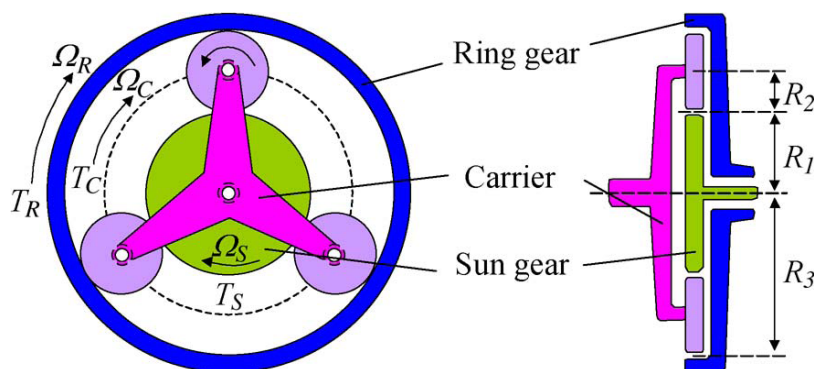


Figura 1.11: Trasmissione planetaria.

Vista la possibilità di propulsione puramente elettrica fornita da questa architettura e dalla configurazione serie, alcune tipologie di veicoli, detti *plug-in hybrid (P-HEV)*, sono dotati di un dispositivo che permette la ricarica delle batterie dalla rete elettrica. Ciò è molto utile nell'utilizzo urbano in cui si riscontra una buona autonomia, con una conseguente riduzione dei consumi e delle emissioni, che può essere estesa grazie agli innumerevoli punti di connessione alla rete elettrica.

In questa sezione vengono presentate le informazioni e gli strumenti software inizialmente disponibili. Queste informazioni sono state accuratamente analizzate, in modo da intraprendere le migliori scelte progettuali per il raggiungimento degli obiettivi della tesi.

2.1 Dati disponibili

Le informazioni a disposizione per la realizzazione del progetto di tesi riguardano la batteria ed il veicolo che viene utilizzato per realizzare il prototipo marciante.

2.1.1 Motociclo: Aprilia RS4 125

Il veicolo utilizzato per realizzare il prototipo marciante è la motocicletta RS4 125 (Figura 2.1) realizzata dalla casa motociclistica Aprilia [6].

Questo veicolo è spinto da un nuovo motore monocilindrico 125 cc, 4T, 4 valvole, a iniezione elettronica e raffreddato a liquido che adotta una distribuzione a doppio albero a camme in testa (DOHC). Questo propulsore garantisce la massima potenza prevista per questa cilindrata, con un'erogazione fluida e lineare. Per garantire la massima fruibilità della potenza ed un ampio range di utilizzo, il motore è stato coadiuvato da un cambio a sei marce che permette di sfruttarne al meglio la potenza. La tabella 2.1 riporta le specifiche del motore e della trasmissione.

Il telaio è di tipo perimetrale in alluminio, pensato per supportare al meglio le prestazioni del motore garantendo la massima guidabilità. La tabella 2.2 riporta le principali specifiche del telaio e le dimensioni delle parti ad esso collegate.



Figura 2.1: Motoveicolo Aprilia RS4 125.

Scheda tecnica RS4 125: Motore e trasmissione	
Tipo Motore	Monocilindrico 4T, iniezione elettronica, 4V raffreddato a liquidi, Doppio albero a camme.
Alesaggio e corsa	58 × 47 mm
Cilindrata	124,8 cc
Rapporto di compressione	12,5 ± 0,5:1
Cambio	A 6 rapporti, 1° 11/33, 2° 15/30, 3° 18/27, 4° 20/24, 5° 25/27, 6° 23/22
Trasmissione	Primaria: ingranaggi, 69/29 Secondaria: catena, 60/13
Emissioni	Euro 3

Tabella 2.1: Scheda tecnica del motoveicolo Aprilia RS4 125: motore e trasmissione.

Lo scarico, completamente integrato nella parte inferiore della carena, migliora il comportamento dinamico grazie all'accentramento delle masse

Scheda tecnica RS4 125: Telaio e dimensioni	
Telaio	Telaio perimetrale in alluminio
Sospensione anteriore	Forcella Upside Down, 41 <i>mm</i> Escursione ruota 110 <i>mm</i>
Sospensione posteriore	Forcellone asimmetrico, monoammortizzatore Escursione ruota 130 <i>mm</i>
Freni	Ant.: pinza radiale a 4 pistoncini, disco in acciaio inox 300 <i>mm</i> Post.: a disco in acciaio inox 218 <i>mm</i> , pinza con singolo pistoncino 30 <i>mm</i>
Cerchi	In lega leggera a 6 razze sdoppiate, con profilo di tenuta per pneumatici tubeless Ant.: 2.75 × 1 ” Post.: 3.50 × 17 ”
Pneumatici	Ant.: 100/80 - 17 ” Post.: 130/70 - 17 ”
Dimensioni	Lunghezza max 1953 <i>mm</i> Larghezza max 740 <i>mm</i> Altezza max al cupolino 1.138 <i>mm</i> Altezza sella 820 <i>mm</i> Interasse 1.350 <i>mm</i>
Serbatoio	14,5 litri (di cui riserva 3,5 litri)

Tabella 2.2: Scheda tecnica del motoveicolo Aprilia RS4 125: telaio, organi correlati e dimensioni.

del veicolo.

Importanti per la caratterizzazione del motociclo sono le curve di *coppia* e *potenza*, ottenute al banco prova in condizioni di *massima apertura* dell'acceleratore (Tabella 2.3).

In figura 2.2 e figura 2.3 sono riportate le curve di coppia e potenza in funzione del numero di giri che caratterizzano il motore della RS4 125.

Rpm	Coppia [Nm]	Potenza [Kw]	Potenza [CV]
1000	1.52	0.16	0.22
1500	2.28	0.36	0.49
2000	3.04	0.64	0.87
2500	3.80	0.99	1.35
3000	4.56	1.43	1.95
3500	5.32	1.95	2.65
4000	6.08	2.55	3.46
4500	7.06	3.33	4.52
5000	7.50	3.93	5.34
5500	8.05	4.64	6.31
6000	8.31	5.22	7.10
6500	8.75	5.96	8.10
7000	10.05	7.37	10.02
7500	10.68	8.39	11.41
8000	10.73	8.99	12.23
8500	10.33	9.20	12.51
9000	10.44	9.84	13.38
9250	10.33	10.01	13.61
9500	10.15	10.10	13.73
9750	9.91	10.12	13.76
10000	9.68	10.14	13.79
10250	9.42	10.11	13.75
10500	8.96	9.85	13.40
10750	8.53	9.60	13.06
11000	8.04	9.26	12.60

Tabella 2.3: Caratterizzazione del motociclo RS4 125.

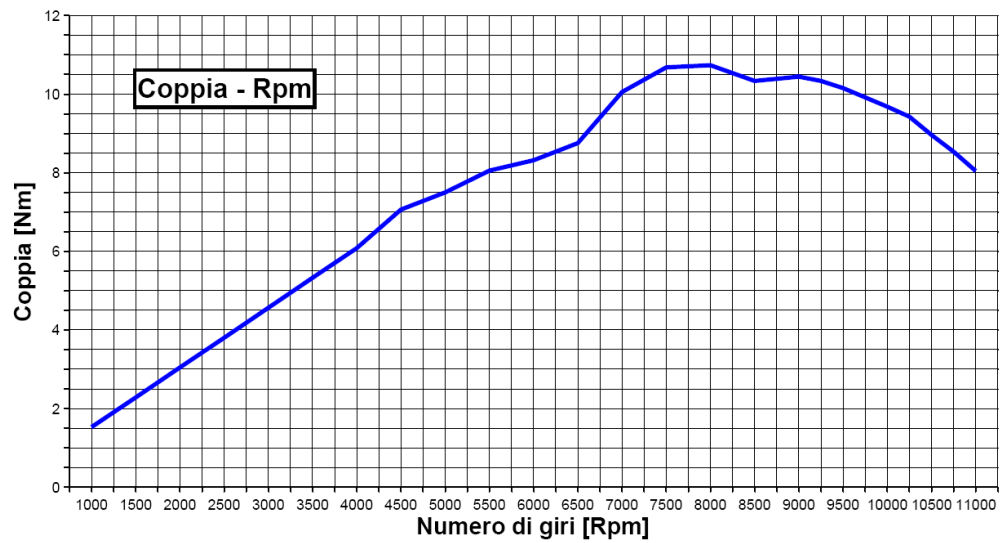


Figura 2.2: Caratteristica coppia - rpm del motociclo Aprilia RS4 125.

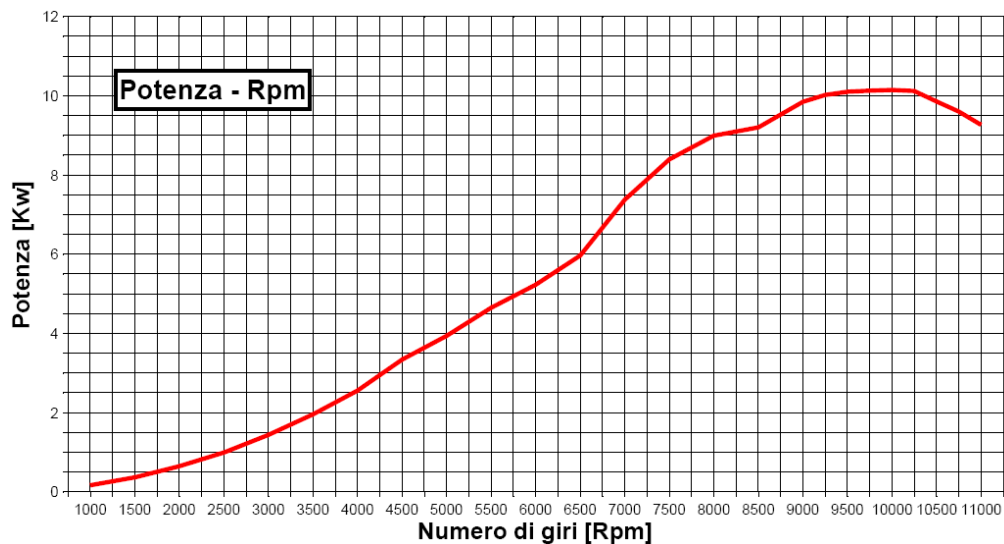


Figura 2.3: Caratteristica potenza - rpm del motociclo Aprilia RS4 125.

2.1.2 Batteria

Per quanto riguarda la batteria, come indicato nel dimensionamento delle macchine elettriche [7], sono disponibili solamente il datasheet, fornito dalla ditta produttrice, il numero di celle che la costituiscono e la strategia di ricarica. La batteria è realizzata utilizzando le celle SLPB100216216H della casa produttrice Kokam [8]. Questi accumulatori sono realizzati utiliz-

zando la tecnologia Litio - Polimerico (Li-Po), offrendo numerosi vantaggi rispetto alle celle tradizionali agli ioni di Litio (Li-ion) tra cui:

- eliminazione del rischio di incendio delle celle in quanto costituite da polimeri non infiammabili;
- la struttura flessibile delle celle non richiede particolari involucri metallici per il loro collegamento, ottenendo quindi un notevole risparmio di peso. La loro struttura prismatica permette inoltre un impaccettamento delle celle molto denso e privo di spazi vuoti, ottenendo un aumento della densità di energia di circa il 20% rispetto alle celle Li-ion tradizionali aventi forma cilindrica (Figura 2.4).

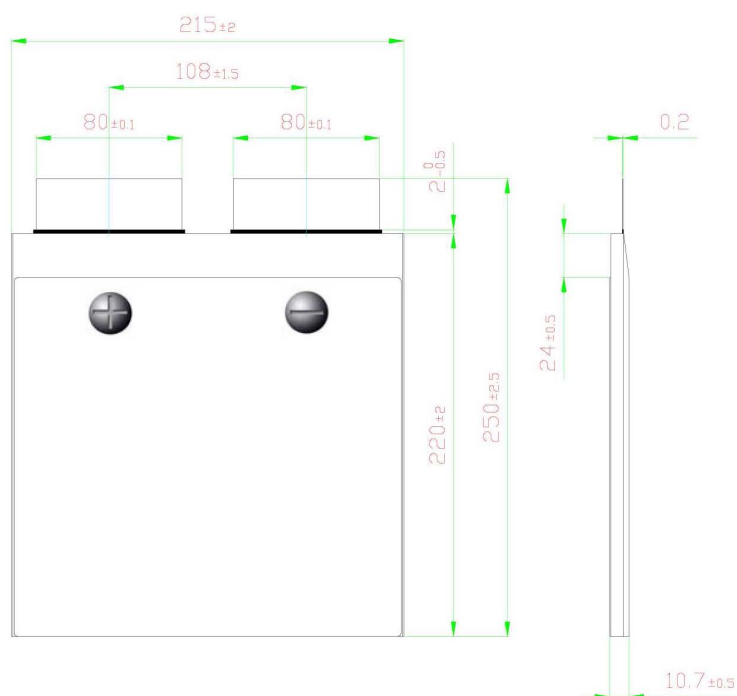


Figura 2.4: Struttura e dimensioni degli accumulatori SLPB100216216H.

La tabella 2.4 riporta le principali specifiche degli accumulatori in esame. Le caratteristiche di interesse sono le condizioni di *carica* e di *scarica*, che descrivono i valori di tensione e corrente massimi nelle due fasi, e la tensione di *cut-off* o tensione di fine scarica: questo valore indica il voltaggio minimo a cui si deve arrestare la scarica della batteria, in modo da evitare danneggiamenti permanenti dell'accumulatore o sensibili riduzioni del tempo di vita.

Capacità tipica ^a		40 Ah
Tensione nominale		3,7 V
Condizioni di carica	Corrente Max.	80 A
	Tensione	4,2 ± 0,03 V
Condizioni di scarica	Corrente continua	200 A
	Corrente di picco	400A
	Tensione di Cut-off	2,7 V
Ciclo di vita [@ 80% DOD] ^b		> 1200 <i>cicli</i>
Temperature di lavoro	Carica	0 ~ 40° C
	Scarica	-20 ~ 60° C
Dimensioni	Spessore	10,7 ± 0,5 mm
	Larghezza	210 ± 2,0 mm
	Altezza	220 ± 2,0 mm
Peso		1100 ± 40 g

^a Capacità tipica: 0,5 C, 4,2 ~ 2,7 V @ 25° C

^b Range di tensione: 4,15 ~ 3,4 V

Tabella 2.4: Specifiche degli accumulatori SLPB100216216H.

La caratterizzazione delle batterie presente nel datasheet termina con le curve presentate in Figura 2.5 e in Figura 2.6, riportanti rispettivamente l'andamento della tensione e della corrente di carica in funzione del tempo e l'andamento della tensione della cella in funzione dello stato di scarica al variare delle correnti di carica e di scarica.

Queste curve sono molto importanti per valutare le prestazioni dell'accumulatore in fase di carica e scarica. In particolare sfruttando tali curve è possibile ottenere una stima dei valori di tensione al variare del tempo di carica e dello stato di carica della cella.

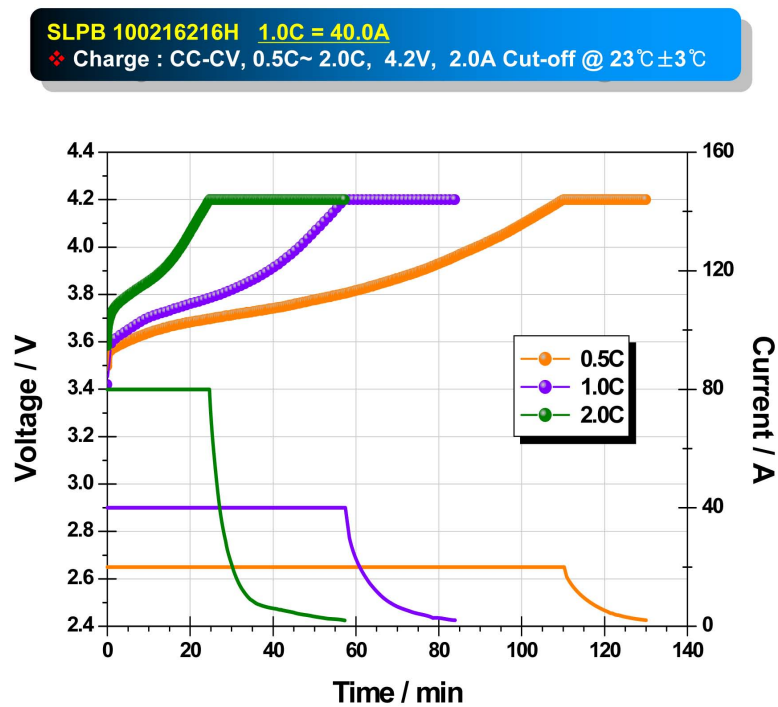


Figura 2.5: Curve di carica degli accumulatori kokam SLPB100216216H.

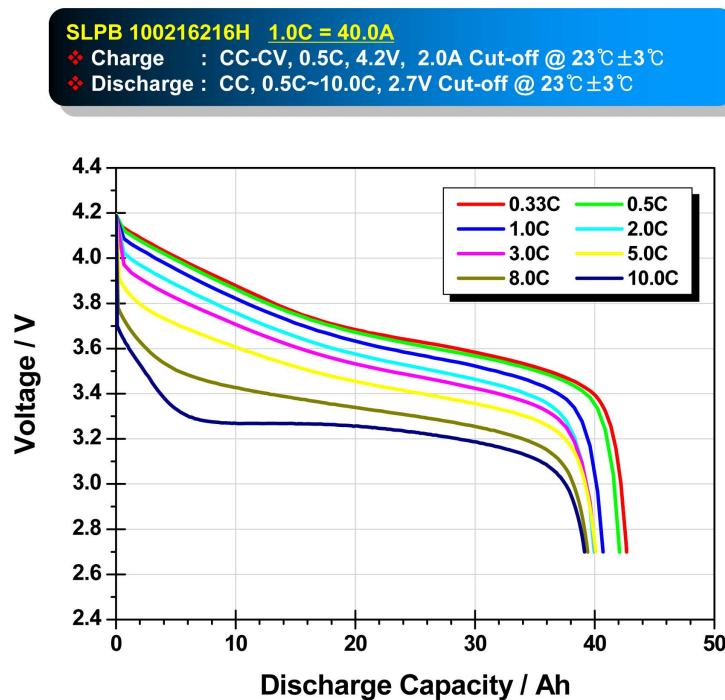


Figura 2.6: Curve di scarica degli accumulatori kokam SLPB100216216H.

2.1.3 Il prototipo

Partendo dalla moto precedentemente presentata, verrà realizzato un prototipo ibrido con architettura simile a quella BAS, sostituendo all'alternatore una macchina elettrica reversibile calettata all'albero motore (Figura 2.7). Quest'ultima, dimensionata in [7], verrà utilizzata per realizzare l'effetto boost e per il recupero di energia necessario a ricaricare gli accumulatori.

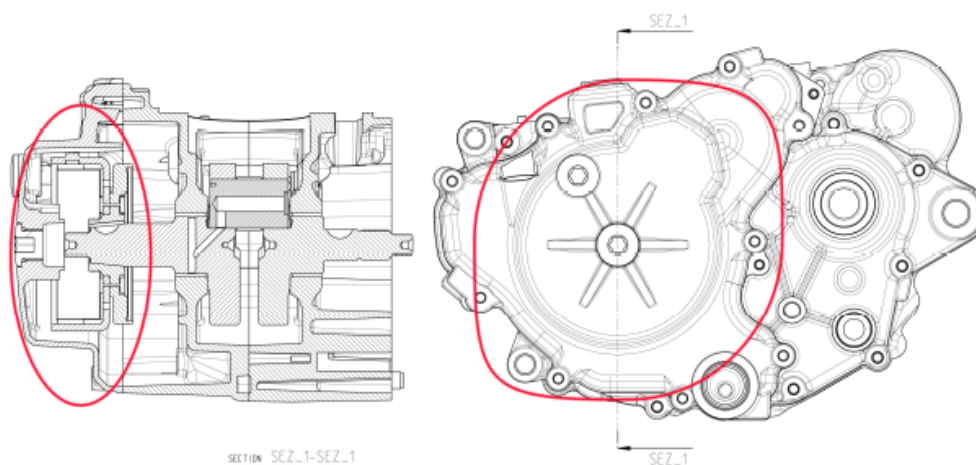


Figura 2.7: Architettura BAS.

Per quanto riguarda il boost di coppia [7] esso è stato inizialmente dimensionato seguendo le richieste del settore marketing. Tali richieste prevedevano di mantenere una potenza massima entro i limiti stabiliti, fornendo un incremento di coppia molto cospicuo in tutta la fascia compresa tra i 4000 ed i 9000 giri al minuto. Tali richieste sono state successivamente ridimensionate, anche in base alle opinioni del gruppo di collaudatori del settore sperimentale, fino ad arrivare alla caratteristica riportata in Figura 2.8.

Questa curva è stata pensata per migliorare le prestazioni della moto ai bassi regimi, in particolare nella zona compresa tra i 1500 e i 7000 giri in modo da rispettare il vincolo sulla potenza massima imposto dal codice della strada ed il vincolo di carica della batteria. Si richiede infatti che al termine del ciclo di utilizzo la batteria abbia un livello energetico analogo a quello iniziale.

Tutti gli studi iniziali sono stati realizzati utilizzando le telemetrie del ciclo di guida WMTC (World-wide Motorcycle Emissions Test Cycle) co-

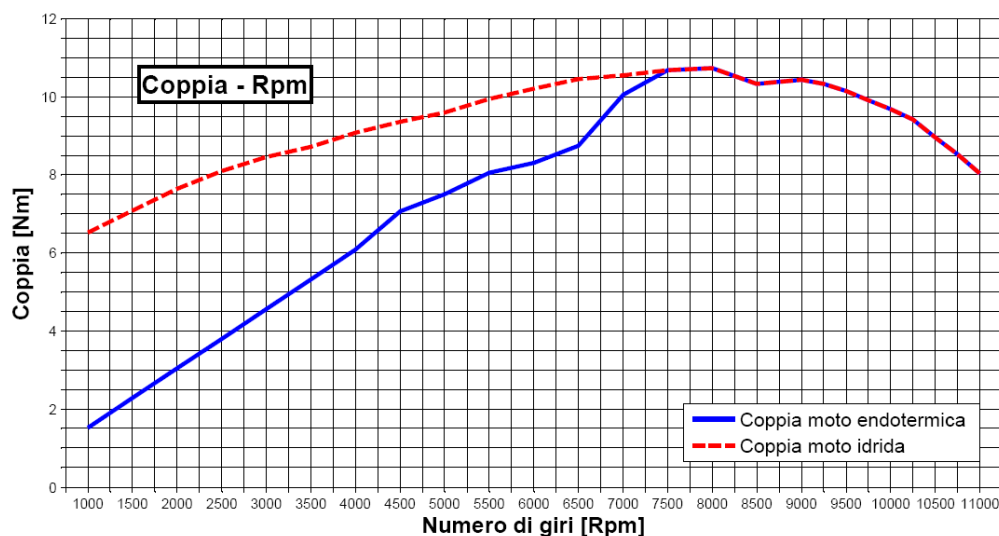


Figura 2.8: Curva di coppia della moto ibrida.

me riferimento. Questo ciclo di guida¹ viene realizzato facendo seguire alla motocicletta dei profili di velocità standard con la farfalla aperta al massimo, variando la tabella delle cambiate in funzione della tipologia di moto in esame. Il ciclo si compone di tre parti principali per una durata di 18 minuti:

- da 0 a 6 minuti: ciclo urbano;
- da 6 a 12 minuti: ciclo extraurbano;
- da 12 a 18 minuti: ciclo autostradale.

Per la moto in esame, non potendo accedere all'autostrada a causa dei limiti di cilindrata, viene considerato il ciclo wmtc limitato ai primi 12 minuti. Sfruttando i dati telemetrici ricavati da questo test è stato possibile verificare l'andamento energetico del pacco batterie nel corso del ciclo di guida, adattando il boost di coppia in modo da completare il ciclo di guida rispettando il vincolo energetico. La tabella 2.5 riporta i valori di boost di coppia che il veicolo fornirà in funzione del numero di giri (rpm) del motore endotermico valutati con l'acceleratore al massimo.

Correlato alla scelta della mappatura del boost risultano essere il *dimensionamento della batteria* ed il calcolo del *numero minimo di giri* necessario per effettuare la ricarica degli accumulatori. Per quanto riguarda

¹Un ciclo di guida è un insieme di valori di velocità dati secondo per secondo, che vengono fatti assumere ad un veicolo. Esso è usato per eseguire una valutazione comparativa dei consumi e dei livelli di emissione dei veicoli

rpm	boost [Nm]	coppia motore endotermico [Nm]	coppia motore ibrido[Nm]
1000	5.0	1.52	6.52
1500	4.8	2.28	7.08
2000	4.6	3.04	7.64
2500	4.4	3.80	8.1
3000	3.9	4.56	8.46
3500	3.4	5.32	8.72
4000	3.0	6.08	9.08
4500	2.3	7.06	9.36
5000	2.1	7.50	9.6
5500	1.9	8.05	9.95
6000	1.9	8.31	10.21
6500	1.7	8.75	10.45
7000	0.5	10.05	10.55
7500	0.0	10.68	10.68
8000	0.0	10.73	10.73
8500	0.0	10.33	10.33
9000	0.0	10.44	10.44
9250	0.0	10.33	10.33
9500	0.0	10.15	10.15
9750	0.0	9.91	9.91
10000	0.0	9.68	9.68
10250	0.0	9.42	9.42
10500	0.0	8.96	8.96
10750	0.0	8.53	8.53
11000	0.0	8.04	8.04

Tabella 2.5: Boost di coppia e caratterizzazione del motociclo ibrido in funzione del numero di giri (rpm).

la batteria, essendo la tensione ai poli variabile in fase di erogazione e di ricarica, in fase di progetto sono state inizialmente considerate le tensioni medie o nominali. Stabilita la mappatura del boost e le relative potenze, in fase di scarica la batteria deve essere in grado di erogare la massima potenza richiesta dal motore elettrico (P_{max}), che risulta essere proporzionale alla velocità di rotazione del motore (ω) e alla coppia erogata (T) secondo la seguente relazione:

$$P = T \cdot \omega. \quad (2.1)$$

La potenza richiesta alla batteria (P_{acc}) deve tuttavia tenere conto dell'efficienza del motore elettrico ($\eta_{motore} < 1$) e dell'inverter ($\eta_{inverter} < 1$), risultando quindi superiore a quella erogata.

$$P_{acc} = P_{max} \cdot \eta_{motore}^{-1} \cdot \eta_{inverter}^{-1} \quad (2.2)$$

A questo punto, conoscendo la tensione media di scarica ($V_{scarica}$) e la corrente media di scarica ($I_{scarica}$), è possibile ricavare il numero di celle minimo della batteria:

$$celle = \frac{P_{acc}}{(V_{scarica} \cdot I_{scarica})}. \quad (2.3)$$

Per quanto riguarda la ricarica della batteria, il numero di giri minimo richiesto varia in base alla strategia di ricarica scelta, considerando la tensione media (V_{carica}) in fase di calcolo. Per garantire che la strategia di carica scelta venga rispettata e che quindi ciascuna cella venga ricaricata alla corrente (I_{carica}) stabilita, è necessario che il motore sia in grado di erogare la potenza richiesta dagli accumulatori in fase di carica:

$$P_{carica} = celle \cdot V_{carica} \cdot I_{carica}. \quad (2.4)$$

Come nel caso precedente, la potenza richiesta all'asse risulta essere superiore a quella richiesta dalle batterie, in quanto si devono considerare le non idealità del motore elettrico e dell'azionamento:

$$P_{asse} = P_{carica} \cdot \eta_{motore}^{-1} \cdot \eta_{inverter}^{-1}. \quad (2.5)$$

A questo punto, sfruttando la relazione 2.1 e la coppia media della moto (T_{med}) si ottiene la velocità angolare minima, che può successivamente essere convertita in rpm.

Dopo averne brevemente riassunto la procedura, vengono riportati i valori utilizzati per il dimensionamento della batteria usando gli accumulatori presentati in sezione 2.1.2 ed i relativi risultati. La tabella 2.6 riporta

η_{motore}	0.859
$\eta_{inverter}$	0.900
T_{med}	3.3 Nm

Tabella 2.6: Costanti usate nel dimensionamento.

i valori di efficienza del motore e dell'inverter ed il valore di coppia media usati nel dimensionamento.

La tabella 2.7 riporta i risultati del dimensionamento, i valori nominali ed il numero di giri minimo al variare della strategia di ricarica², con riferimento alla mappatura di boost precedentemente presentata (Figura 2.8 e Tabella 2.5).

Fase di Scarica	
<i>celle</i>	4
$V_{scarica}$	3.4 V
$I_{scarica}$	200 A
Fase di carica	
V_{carica}	3.9 V
Ricarica a 1C	I_{carica} 40 A
	rpm_{min} 2336
Ricarica a 2C	I_{carica} 80 A
	rpm_{min} 4671

Tabella 2.7: Valori nominali e risultati del dimensionamento.

2.2 Software disponibile: Simulazione statica

Oltre ai dati, all'inizio del progetto di tesi è stato reso disponibile un software di simulazione statica realizzato dall'Ing Fabio Maran. Il simulatore, realizzato in MatLab, è basato sugli studi precedenti [7] e permette di

²La strategia di ricarica, indicata con kC indica il valore della corrente di ricarica, che risulterà essere di k volte del valore nominale di capacità espresso in Ah .

verificare l'andamento energetico del pacco batterie a partire dalle telemetrie di un ciclo di guida, validandone il dimensionamento al variare della mappatura del boost di coppia. Il software, avendo a disposizione tutti i dati al proprio avvio, può operare secondo uno schema anticausale³ ed è composto, nell'ordine, da 5 parti principali:

- Inizializzazione dei dati.
- Calcolo ed elaborazione degli intervalli di boost.
- Calcolo ed elaborazione degli intervalli di carica.
- Computo energetico.
- Visualizzazione dei dati.

2.2.1 Inizializzazione dei dati

Il primo blocco di istruzioni del software ha il compito di caricare i dati in apposite variabili e strutture dati, necessarie all'esecuzione della simulazione. In particolare vengono caricati i dati telemetrici di velocità (*speed*), numero di giri (*rpm*) ed il relativo riferimento temporale ricavati dal ciclo di guida WMTc. Per eliminare eventuali mancate misurazioni o variazioni del tempo di campionamento, i dati vengono interpolati in base al tempo di campionamento (T_c), calcolandone successivamente la derivata discreta.⁴ I nuovi segnali ottenuti dalla procedura di derivazione descrivono l'andamento del corrispondente segnale in funzione del tempo, identificandone ad ogni istante la pendenza. Analizzando questi segnali si nota tuttavia un'elevata rumorosità causata dall'ambiente di rilevazione e pertanto essi vengono filtrati mediante un filtro di tipo passa basso. Questa operazione viene effettuata usando il filtro di Butterworth⁵ in quanto, grazie all'ottima linearità in banda passante, non introduce distorsioni. Tuttavia, per garantire una buona selettività è necessario aumentare l'ordine del filtro, introducendo così un elevato sfasamento. Tale problema viene risolto effettuando un doppio filtraggio dei dati, prima in avanti e poi all'indietro, annullando così lo sfasamento e le componenti di rumore in alta frequenza del segnale.

³In questo caso si intende che all'istante t il segnale valuta i valori assunti al tempo $t + T_c$

⁴Dato un segnale s campionato con tempo di campionamento T_c , la derivata discreta è data da $\frac{s(t+T_c)-s(t)}{T_c}$ o $\frac{s(t)-s(t-T_c)}{T_c}$.

⁵Il filtro passa basso di Butterworth (o di massima linearità) di ordine n è definito come $H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1)+b(2)z^{-1}+\dots+b(n+1)z^{-n}}{1+a(2)z^{-1}+\dots+a(n+1)z^{-n}}$.

Dopo aver caricato e preelaborato i dati telemetrici, il software procede all'inizializzazione della mappatura di boost (Tabella 2.5) salvata, per praticità, all'interno di un file di testo. Osservando la tabella 2.5 si nota che la caratterizzazione della curva di boost è definita per un numero limitato di valori di rpm e non per ogni valore osservabile sul motociclo. Per ottenere una mappatura completa i dati vengono quindi interpolati linearmente sul numero di giri con passo uno, ottenendo così il valore di boost corrispondente a ciascun valore di rpm⁶ ed impostando a 0 il valore di coppia per tutti i valori di rpm compresi tra 0 e il limite di attivazione del boost.

Dopo aver definito la curva di boost, il software procede all'inizializzazione delle variabili che descrivono il sistema di alimentazione del motore elettrico, che può essere realizzato mediante supercondensatori⁷ o tramite accumulatori. Nel primo caso, conoscendo la capacità di ciascun supercondensatore, il tipo di collegamento e il numero di componenti capacitive, il software calcola la massima energia disponibile nel sistema di alimentazione e l'energia minima che ne garantisce la soglia di tensione minima. Nel secondo caso, una volta impostati i parametri degli accumulatori da utilizzare, il numero di celle, i livelli di tensione media in fase di carica e scarica e la corrente di carica, vengono calcolati i seguenti valori:

- Potenza di carica: $P_{carica} = V_{carica} \cdot I_{carica} \cdot celle$
- Massima energia disponibile: $E_{tot} = V \cdot Q \cdot celle = (V_{scarica} - V_{cut-off}) \cdot Ah \cdot 3600 \cdot celle$

A questo punto, mediante un flag, il software permette di selezionare quale sistema di alimentazione utilizzare nella simulazione, impostando correttamente i limiti energetici che dovranno essere rispettati durante la simulazione. Per garantire la massima parametrizzazione del software, vengono create delle variabili rappresentanti i limiti di giri necessari alla ricarica, i limiti di giri per l'attivazione del boost, le efficienze del motore elettrico e dell'inverter e, nel caso si utilizzino i super condensatori, la coppia utilizzata in fase di ricarica (T_{carica}).

⁶Rpm, Revolution per minute, descrive il numero di rotazioni complete dell'albero motore completate in un minuto.

⁷Un supercondensatore (detto anche supercapacitore) è un particolare condensatore che ha la caratteristica di accumulare una quantità di carica elettrica eccezionalmente grande rispetto ai condensatori tradizionali. Infatti mentre questi ultimi hanno valori di capacità dell'ordine dei mF , i supercondensatori possono arrivare oltre i $5000 F$ (farad) e vengono prevalentemente utilizzati come accumulatori di energia elettrica. Rispetto agli accumulatori chimici presentano il vantaggio di poter essere caricati o scaricati quasi istantaneamente, garantendo così un'elevatissima potenza specifica, potendo tuttavia immagazzinare una quantità di energia inferiore.

Infine, per poter fare degli studi che prevedano una limitazione della durata del boost, nel blocco in esame viene definita una variabile rappresentante il limite temporale ed un flag per l'abilitazione dei relativi controlli.

Come si può facilmente intuire, potendo impostare tutti i parametri della simulazione tramite il blocco in oggetto, il software risulta essere nel complesso molto flessibile, richiedendo la modifica dei soli parametri presentati in questa sezione, nel caso vengano variati il dimensionamento della batteria, la mappatura del boost di coppia o le componenti del prototipo.

2.2.2 Calcolo ed elaborazione degli intervalli di boost

Dopo aver impostato tutti i parametri della simulazione ed aver caricato e preelaborato i dati telemetrici, il software procede al calcolo degli intervalli del ciclo di guida in cui dovrà essere erogato il boost di coppia. Dovendo migliorare le prestazioni del motore endotermico, il motore elettrico dovrà intervenire nelle fasi di accelerazione, caratterizzate da un andamento crescente del numero di giri e della velocità del motociclo. Questo andamento può essere tuttavia violato durante i cambi marcia nei quali, per effetto dell'azionamento della frizione, si ha un rapido calo degli rpm in corrispondenza di un incremento di velocità. L'individuazione degli intervalli di boost avviene quindi osservando dapprima la derivata della caratteristica velocità-tempo, individuandone i valori positivi (incremento di velocità) in cui il regime di giri sia compreso tra il limite minimo e il limite massimo di giri motore per l'attivazione del boost. A questo punto, valutando la derivata della caratteristica rpm-tempo, il software può riconoscere i cambi marcia presenti in ciascun tratto temporale precedentemente individuato, eliminando l'abilitazione del boost per tutta la loro durata (Figura 2.9). In corrispondenza dei cambi marcia, la derivata degli rpm assume infatti valori negativi e con modulo elevato, pertanto essi possono essere facilmente individuati imponendo un valore di soglia. Ciò si nota osservando la figura 2.9 dove, nell'intervallo compreso tra i 110 ed i 140 secondi sono presenti due cambi marcia, in corrispondenza dei quali il boost viene disabilitato.

Come precedentemente accennato, il software consente di limitare la durata del boost pertanto, nel caso tale opzione sia stata attivata, ogni intervallo di boost viene verificato, anticipandone il punto finale nel caso esso superi il limite stabilito.

Una volta generato il segnale di abilitazione del boost, il blocco in esame calcola per ciascun istante temporale la potenza richiesta alla batteria. Tale valore viene calcolato usando la (2.2) convertendo la velocità angolare in rpm, e consultando la mappatura del boost per ottenere il valore di coppia

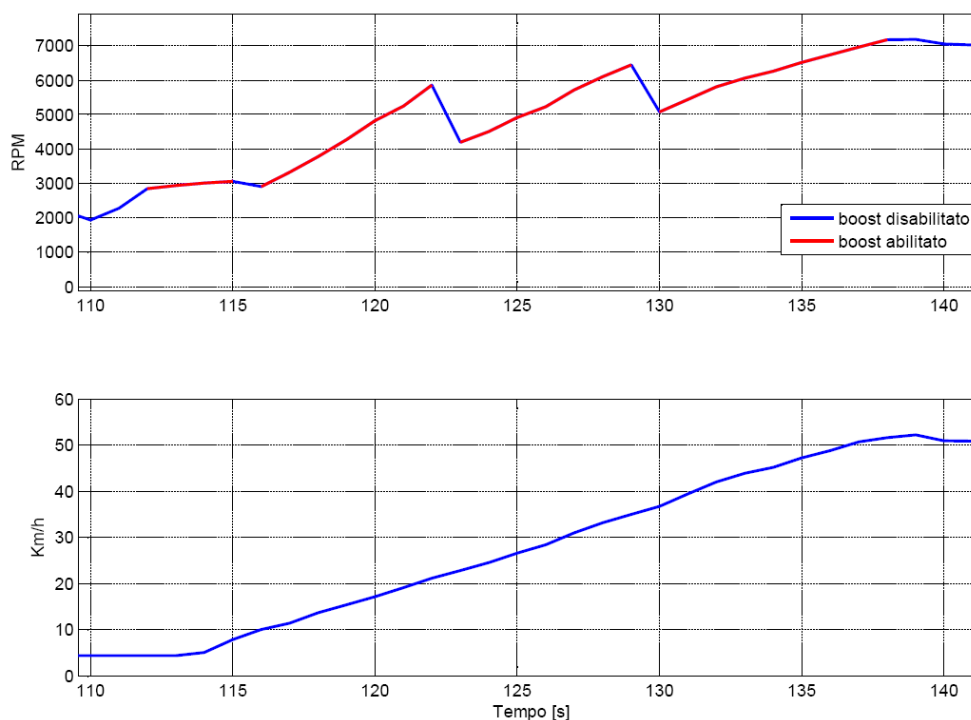


Figura 2.9: Caratteristiche rpm-tempo e velocità-tempo in fase di boost.

erogato dal motore elettrico in funzione del numero di giri assunto dal motore endotermico all'istante in esame.

$$P_{boost}(kT_c) = T_{boost}(\omega(kT_c)) \cdot \omega(kT_c) \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \eta_{motore}^{-1} \cdot \eta_{inverter}^{-1} \quad (2.6)$$

Una volta determinate le potenze richieste dal boost di coppia in ogni istante, effettuando un'integrazione trapezoidale tra istanti di campionamento successivi viene calcolata l'energia spesa in fase di boost per ciascun intervallo di campionamento, successivamente utilizzata per il calcolo del bilancio energetico dell'intero ciclo di guida.

2.2.3 Calcolo ed elaborazione degli intervalli di carica

La determinazione degli intervalli di carica viene effettuata seguendo un algoritmo simile a quello della sezione precedente. Per garantire il massimo recupero di energia, la fase di ricarica della batteria viene effettuata quando il motociclo viaggia a velocità costante e in fase di rallentamento, entrambi momenti caratterizzati da un andamento costante o decrescente della curva velocità. Sfruttando la derivata discreta dei dati telemetrici di velocità, il

software individua gli intervalli in cui essa assume valori nulli (velocità costante) o negativi (rallentamento) in cui il regime di giri del motore è superiore al limite minimo di rpm necessario per la strategia di ricarica (Figura 2.10).

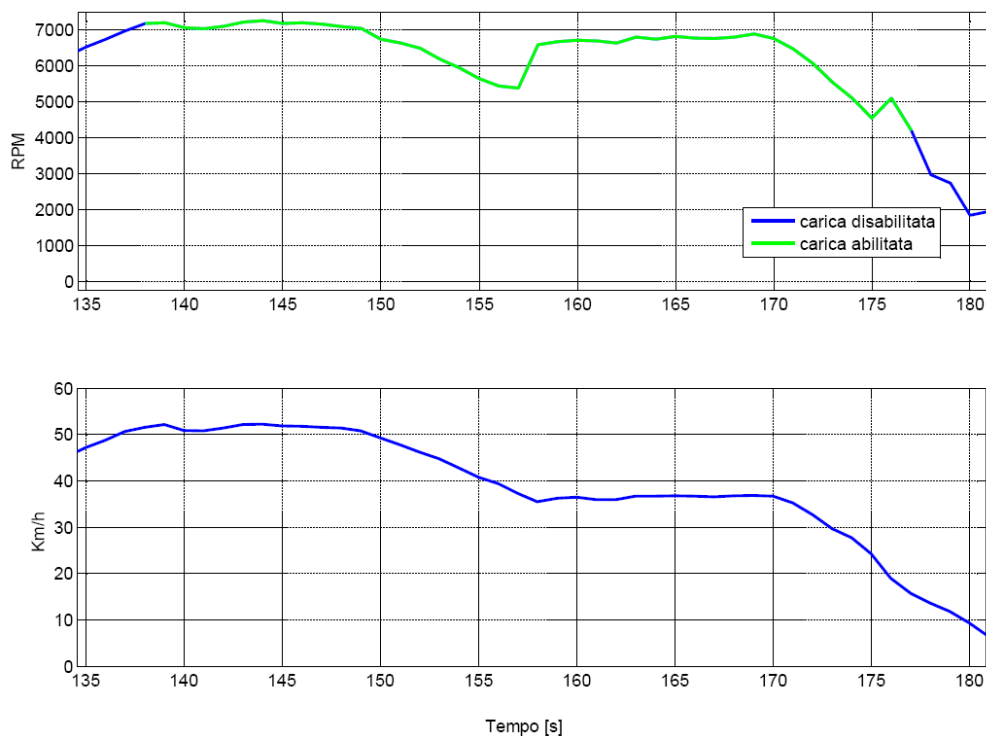


Figura 2.10: Caratteristiche rpm-tempo e velocità-tempo in fase di ricarica.

Osservando la figura si nota come nell'intervallo compreso tra 175 e 180 secondi il boost venga disabilitato, sebbene la caratteristica di velocità continui a scendere, a causa del raggiungimento di regimi di giri che non permettono la ricarica. Inoltre, si nota come tra i 145 e 150 secondi venga mantenuta attiva la carica sebbene la caratteristica di velocità cresca lentamente. Il valore che determina la nullità della derivata è stato infatti posto leggermente sopra lo zero, permettendo di trattare in modo corretto i tratti in cui la velocità risulta mediamente costante. Questo limite, utilizzato anche per l'abilitazione del boost, rende il sistema meno sensibile alle piccole variazioni di velocità del motociclo attorno a quella di crociera.

Come nel caso precedente, dopo aver stabilito gli istanti di abilitazione della carica, il blocco in esame procede al calcolo delle potenze generate dalla macchina elettrica in ciascun istante, considerando il tipo di alimentazione scelta per la simulazione. Nel caso vengano scelti i supercondensa-

tori, le potenze vengono calcolate tramite la 2.2, ed utilizzando un valore di coppia T_{carica} in grado di garantire la carica corretta.

$$P_{caricaSC}(kT_c) = t_{carica} \cdot \omega(kT_c) \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \eta_{motore}^{-1} \cdot \eta_{inverter}^{-1}. \quad (2.7)$$

Nel caso in cui la batteria venga realizzata utilizzando gli accumulatori, la potenza di ricarica viene calcolata usando i valori nominali riportati in tabella 2.7, considerandola costante in ogni istante.

$$P_{caricaACC}(kT_c) = V_{carica} \cdot I_{carica} \cdot celle. \quad (2.8)$$

A questo punto, come nel caso del boost, effettuando un'integrazione trapezoidale tra le potenze di carica di istanti di campionamento successivi, viene calcolata l'energia caricata per ciascun intervallo di campionamento, successivamente utilizzata per il calcolo del bilancio energetico dell'intero ciclo di guida.

2.2.4 Computo energetico

Una volta elaborati gli intervalli di carica e scarica, il software possiede tutte le informazioni necessarie per procedere al computo energetico dell'intero ciclo di guida. Ciò avviene sommando i contributi energetici di carica (positivi) e di scarica (negativi) in ciascun istante di campionamento al livello energetico attuale, ottenendo così la caratteristica energia-tempo. Per garantire il massimo contributo informativo, nel caso in cui si verificino deficit energetici in fase di boost o eccessi in fase di ricarica il software pone il livello energetico della batteria al valore minimo o al valore massimo, tenendo traccia dello scompenso energetico. Ciò permette di verificare un eventuale sottodimensionamento o sovradimensionamento della batteria e di migliorare la mappatura del boost di coppia per il ciclo di guida di riferimento.

2.2.5 Visualizzazione dei dati

Le informazioni ottenute dall'elaborazione dei dati telemetrici vengono infine visualizzate all'utente tramite due immagini riportanti rispettivamente:

- il grafico della caratteristica rpm-tempo evidenziando i tratti di boost (rosso) e di carica (verde), l'andamento energetico della batteria (con i relativi limiti superiori ed inferiori) e gli eccessi energetici (Figura 2.11);

- il grafico dello stato di carica in funzione del tempo ed i relativi limiti superiore ed inferiore (Figura 2.12).

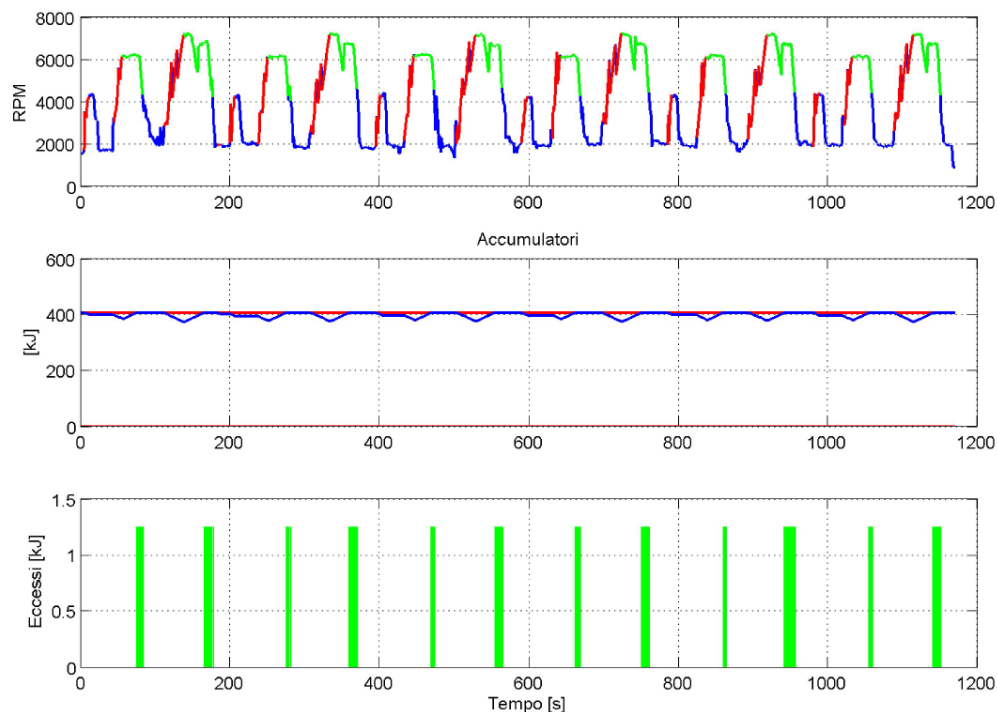


Figura 2.11: Grafico 1: caratteristiche rpm-tempo, energia-tempo e deficit/eccessi-tempo.

2.3 Considerazioni ed obiettivi

Analizzando i dati e il software emergono le seguenti considerazioni:

- la simulazione statica, basata sulle telemetrie del ciclo WMTC, risulta molto utile per effettuare degli studi qualitativi preliminari riguardanti il dimensionamento delle batterie e lo studio della mappatura di coppia. Tuttavia, si riscontra la mancanza di un modello che rappresenti il comportamento in maniera più fedele alla realtà permettendo così di affinare gli studi preliminari già condotti. A tal proposito, gli studi precedenti hanno dimostrato come l'utilizzo di supercondensatori per la realizzazione della batteria sia poco profittevole a causa del costo eccessivo e dell'elevato ingombro, pertanto tale scelta progettuale è stata abbandonata a favore dell' utilizzo di accumulatori

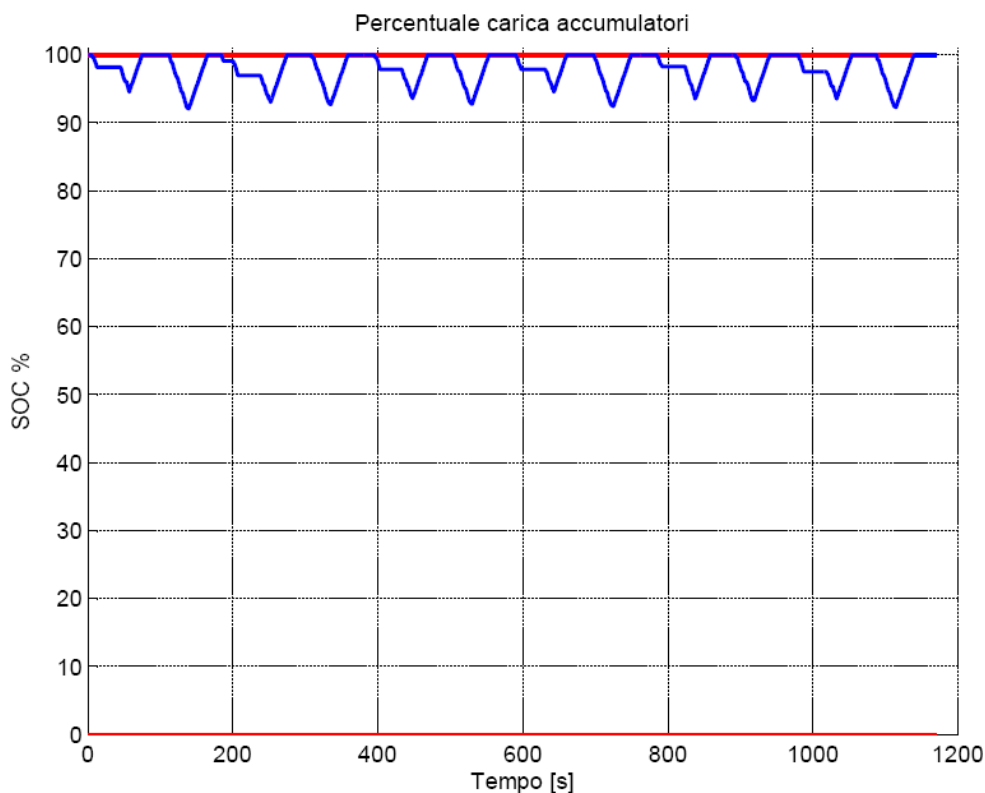


Figura 2.12: Grafico 2: caratteristica SOC-tempo.

elettrochimici. Tuttavia, essendo ancora a livello di studi qualitativi, il modello da realizzare dovrà essere basato sui soli dati messi a disposizione dai costruttori, consentendo così di mettere a confronto in maniera rapida varie tipologie di accumulatori.

- I dati e il software disponibili non consentono di effettuare delle analisi sulle differenze prestazionali del motociclo ibrido e di verificare eventuali problemi di stabilità del veicolo in fase di erogazione del boost. Inoltre, la simulazione statica non tiene in considerazione la parzializzazione dell'acceleratore, caratteristica fortemente dipendente dallo stile di guida del pilota e dalle condizioni stradali. Da tutto ciò emerge quindi la necessità di realizzare un ambiente di simulazione in grado di emulare il comportamento dinamico del motociclo ibrido, fornendo tutti i segnali telemetrici utili alla realizzazione ed alla verifica del funzionamento del sistema di controllo real time del motociclo.
- Emerge inoltre l'assenza di strategie di controllo del veicolo che per-

mettano di migliorare l'utilizzo del motore elettrico in base alle condizioni di guida scelte, sfruttando al meglio la potenza aggiuntiva da esso fornita. Inoltre, si riscontra la mancanza di un sistema che permetta di gestire il livello di carica della batteria che risulta essere sensibilmente influenzato dalle condizioni di guida e dalla strategia di intervento del motore elettrico. Sfruttando la simulazione dinamica, tali strategie potrebbero quindi essere confrontate e validate, permettendo di ottimizzare il sistema complessivo.

In relazione alle considerazioni precedenti, emerge quindi che gli obiettivi sono:

- lo studio e la realizzazione di un modello in grado di rappresentare in maniera accurata l'andamento delle grandezze fisiche della batteria al variare dello stato di carica.
- Lo studio e la realizzazione di un ambiente di simulazione dinamico.
- Lo studio e la realizzazione di un sistema di controllo e di alcune strategie per il motociclo ibrido.

Per garantire continuità con gli studi precedenti e permettere il *fast prototyping* dei sistemi di sistemi e strategie di controllo per il motociclo ibrido, si è scelto di sfruttare gli ambienti MatLab e Simulink per la realizzazione di ciascuna componente software richiesta.

Modellazione della batteria

Una delle componenti fondamentali dei veicoli ibridi è la *batteria* che fornisce l'energia necessaria al funzionamento del motore elettrico e immagazzina quella ottenuta dal sistema di recupero. Durante le varie fasi di progettazione risulta quindi fondamentale disporre di un *modello* che permetta di descrivere il comportamento della batteria con il grado di dettaglio desiderato. Il comportamento degli accumulatori dipende infatti da un elevatissimo numero di variabili interne ed esterne, come ad esempio la temperatura interna, il numero di cicli di carica e scarica (aging) e le condizioni operative e molte altre. Variazioni di queste grandezze corrispondono a mutamenti della resistenza interna, riduzione della capacità, danneggiamento dell'accumulatore ed effetto memoria. Quest'ultimo, particolarmente evidente nelle batterie di tipo nichel cadmio (NiCd) e nichel metalidrato (NiMH), si verifica nel caso in cui gli accumulatori vengano ripetutamente ricaricati prima del completo esaurimento dell'energia disponibile, causando alterazioni delle strutture cristalline interne che riducono la capacità di accumulo di una quantità pari all'energia residua (memorizzata) all'inizio del ciclo di carica. Come intuibile, una modellazione completa della batteria risulta eccessivamente dispendiosa, pertanto le rappresentazioni utilizzate vengono adattate in modo da catturare gli aspetti rilevanti per lo studio effettuato.

Le principali rappresentazioni utilizzate per la simulazione degli accumulatori sono due:

- **modelli elettrochimici:** sfruttano le leggi fisiche che regolano i fenomeni elettrochimici, di trasporto e termodinamici che avvengono internamente alla batteria, in accordo a determinate assunzioni [9, 10]. Questi modelli sono molto complessi e richiedono la determinazione di un elevato numero di parametri, garantendo tuttavia

un piccolo errore nella stima del comportamento del convertitore elettrochimico;

- **modelli elettrici:** sfruttano lo schema elettrico equivalente della batteria e le relative leggi per modellarne il comportamento elettrico. Questo approccio, di tipo empirico, consente di modellare facilmente la dinamica degli accumulatori partendo dalle misurazioni di interesse, aumentando o diminuendo l'ordine del sistema in base alle necessità, mettendo in evidenza l'andamento della tensione e della corrente. Lo schema elettrico di riferimento per la modellazione delle batterie è il circuito RC che, a seconda delle necessità, viene esteso per migliorarne l'accuratezza. A tal fine, i valori dei resistori e dei condensatori vengono espressi in funzione della temperatura, dello stato di carica (SOC) e del verso della corrente.

Nel contesto dei veicoli ibridi, l'importanza di un'accurata modellazione della batteria risulta fondamentale, oltre che in fase di progettazione, anche per la realizzazione del sistema di gestione della batteria stessa, il *battery management system (BMS)*, necessario al corretto funzionamento del veicolo. Il battery management system, oltre a fornire lo stato degli accumulatori (temperatura, stato di carica, tensione ai poli), ha il compito di garantire che essi vengano utilizzati correttamente, evitandone il danneggiamento. Questo aspetto risulta cruciale nei moderni veicoli ibridi dotati di batterie al litio (*Li-ion*, *Li-Po*) che necessitano di un'attenta gestione per garantire le migliori prestazioni e l'utilizzo in condizioni di sicurezza. In quest'ottica il BMS risulta essere una parte fondamentale del sistema di controllo del veicolo ibrido, fornendo dati accurati sullo stato degli accumulatori, necessari al corretto funzionamento delle strategie di gestione della propulsione.

Sfruttando una corretta modellazione della batteria il battery management system svolge le seguenti attività:

- **misurazione** delle principali caratteristiche fisiche osservabili del pacco batterie. Le principali quantità misurate sono la temperatura, la tensione e la corrente della singola cella o dell'intera batteria;
- **calcolo** delle informazioni non direttamente misurabili a partire dalle misure dirette. Le principali informazioni calcolate sono lo *stato di carica (SOC)* [11], lo *stato di potenza (SOP)* e lo stato di salute (*state of health - SOH*). Questi tre valori descrivono rispettivamente l'energia residua, la potenza disponibile istantaneamente e la riduzione delle performance in funzione dell'aging;

- **monitoraggio** dei valori limite di alcune caratteristiche misurate e calcolate;
- **comunicazione** dei valori ottenuti dalle tre operazioni precedenti;
- **controllo** della corrente di carica e scarica e del sistema di raffreddamento della batteria in modo da evitare danneggiamenti e stati di instabilità della batteria;
- **bilanciamento** dello stato di carica delle singole celle in modo da aumentare il tempo di vita della batteria. Gli SOC delle singole celle possono infatti differire tra loro a causa di piccole differenze interne, provocando un riduzione della capacità complessiva.

Un ulteriore aspetto da considerare nella realizzazione del battery management system e nella scelta della rappresentazione della batteria riguarda le limitate risorse di calcolo a disposizione. Dovendo operare con vincoli di tempo reale si deve ottenere il giusto trade-off tra precisione e complessità di calcolo. Da questo punto di vista i modelli elettrochimici, anche ridotti, risultano essere particolarmente dispendiosi e non sempre applicabili, motivo per cui negli ultimi anni sono stati sviluppati dei modelli elettrici molto articolati, in grado fornire il giusto compromesso tra accuratezza e tempo di calcolo. Per questo motivo, oltre che per la maggior flessibilità, per la modellazione degli accumulatori si è scelto un approccio basato sullo schema elettrico equivalente.

3.1 Modelli elettrici

Prima di descrivere il modello utilizzato per la simulazione della batteria, in questa sezione viene riportata una breve panoramica sui principali schemi elettrici equivalenti utilizzati e sulle relative tecniche di stima dei parametri.

Come precedentemente accennato, il circuito base per la rappresentazione degli accumulatori è il circuito RC dal quale, nel corso degli anni, ne sono derivati altri più complessi, suddivisibili principalmente in tre categorie:

- modelli elettrici basati sul *teorema di Thevenin*;
- modelli elettrici basati sull' *impedenza*;
- modelli elettrici basati sul *runtime*¹.

¹Il runtime della batteria indica il tempo per quale essa può alimentare un determinato carico prima di scaricarsi

La prima tipologia, nella sua forma base (Figura 3.1) utilizza una resistenza (R_{Series}) e una coppia RC ($R_{Transient}$ e $C_{Transient}$) posti in serie ad un generatore di tensione, per rappresentare i transitori dovuti alla scarica della batteria ad un determinato stato di carica, ipotizzando costante la tensione a circuito aperto ($V_{OC}(SOC)$). In aggiunta, per modellare il fenomeno dell'auto-scarica della batteria, in parallelo al generatore ideale di tensione viene posta una resistenza ($R_{SelfDischarge}$), permettendo così di rappresentare le perdite di carica dovute alle reazioni chimiche che si verificano quando essa non è collegata a nessun carico.

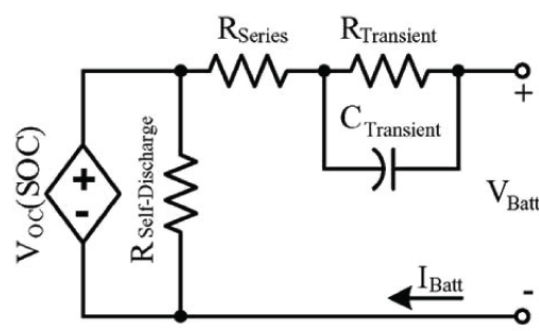


Figura 3.1: Modello elettrico della batteria basato sullo schema di Thevenin.

Il modello in esame ha delle limitazioni dovute alle ipotesi introdotte che, considerando costanti tutti gli elementi dello schema, impediscono di rappresentare le variazioni dovute alle condizioni operative della batteria. Per ovviare a queste problematiche sono state proposte numerose varianti, riepilogate in [12], che tuttavia non riescono rappresentare appieno tutti gli aspetti legati al punto di lavoro e alle condizioni ambientali. Per questo motivo il modello di base viene integrato con funzioni matematiche che modellano le variazioni delle componenti dello schema elettrico iniziale al variare della temperatura e delle condizioni di scarica [13].

Il modello dinamico per le batterie al litio proposto in [13] utilizza una funzione matematica per modellare la tensione a circuito aperto, che viene ricavata dalle curve caratteristiche reperibili sui datasheet grazie ad una semplice procedura costituita da 4 passi principali:

- fitting polinomiale della caratteristica tensione-stato di scarica (*state of discharge - SOD*)² più vicina al punto di lavoro (*corrente di scarica*);

²Lo stato di scarica *SOD* indica la capacità fornita da un processo di scarica a partire dallo stato di piena carica

- calcolo del *fattore di correzione al variare della corrente di scarica* rispetto a quella di riferimento precedentemente scelta ($\alpha(i)$);
- calcolo del *fattore di correzione al variare della temperatura* rispetto a quella di riferimento ($\beta(T)$);
- calcolo della *differenza di potenziale* causata dalla variazione della temperatura rispetto al riferimento scelto ($\Delta E(T)$).

Da questa procedura, vengono ricavate le espressioni che descrivono la tensione di circuito aperto (3.1), la tensione ai poli (3.2) e lo stato di carica (3.3),

$$V_{OC}(SOC) = [i(t), T(t), t] = v[i(t), T(t), t] - R_{int} \cdot i(t), \quad (3.1)$$

$$v_{Batt}[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k \cdot SOD^k[i(t), T(t), t] + \Delta E(T), \quad (3.2)$$

$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \cdot \int_0^t \alpha[i(t)] \cdot \beta[T(t)] \cdot i(t) dt, \quad (3.3)$$

con R_{int} resistenza interna equivalente, c_k coefficiente del k-esimo ordine nella rappresentazione polinomiale della curva di riferimento e Q_r capacità della batteria rispetto alla tensione di cut-off per la curva di riferimento. Il modello presentato opera nelle ipotesi che la concentrazione spaziale interna alla batteria sia uniforme, trascurando le perdite dovute alle dinamiche interne della batteria.

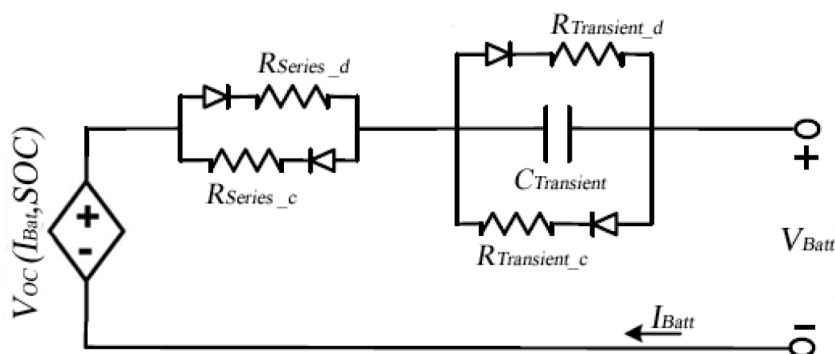


Figura 3.2: Modello elettrico di Thevenin modificato proposto in [14].

Un'altra interessante variante al modello di Thevenin è stata proposta in [14] (Figura 3.2) dove, usando dei diodi ideali, viene modellata la variazione della resistenza interna in fase di carica ($R_{Seriesc}$ e $R_{Transientc}$) e di

scarica ($R_{Seriesd}$ e $R_{Transientd}$).

Inoltre, per rappresentare il differente andamento della tensione in condizioni di carica, scarica o in circuito aperto, si realizzano tre diverse mappe tensione-stato di carica che governano il generatore $V_{OC}(SOC)$ al variare della corrente della batteria (I_{Batt}), impostando una piccola *isteresi* per evitare rapidi cambi di mappatura:

$$V_{OC}(I, SOC) = \begin{cases} V_{OCc}(SOC) & \text{se } I < -1A \\ V_{OCm}(SOC) & \text{se } |I| \leq 1A \\ V_{OCd}(SOC) & \text{se } I > 1A \end{cases}, \quad (3.4)$$

con $V_{OCc}(SOC)$ tensione di circuito aperto in fase di carica, $V_{OCm}(SOC)$ tensione di circuito aperto e $V_{OCd}(SOC)$ tensione di circuito aperto in fase di scarica.

Un approccio simile è stato recentemente presentato in [15] in cui allo schema di Thevenin iniziale viene sostituito il generatore ideale di tensione con un'unica equazione che modella l'andamento della tensione di circuito aperto nelle diverse condizioni, utilizzando una serie di parametri stimati dalle curve caratteristiche.

Il modello della batteria *basato sull'impedenza* (Figura 3.3) utilizza il metodo della spettroscopia dell'impedenza elettrochimica (*electrochemical impedance spectroscopy*)³ per ottenere un complesso circuito equivalente (Z_{ac}) in grado di modellare lo spettro di impedenza. L'impedenza equivalente così ottenuta viene posta in serie ad un generatore ideale di tensione assieme alla resistenza e all'induttanza serie (R_{Series} e L_{Series}) che permettono di modellare la non idealità del generatore in frequenza.

Come nel caso precedente, questo modello opera nell'ipotesi che lo stato di carica sia fissato, impedendo di rappresentare la risposta della batteria al variare delle condizioni operative.

I modelli *basati sul runtime* (Figura 3.4) sfruttano una complessa rete elettrica per modellare il comportamento della batteria durante la fase di scarica a corrente costante. La rete è realizzata dalla combinazione di resistori e generatori di tensione e corrente pilotati, ed è suddivisa in tre sottoreti che modellano rispettivamente:

³Il metodo delle spettroscopia dell'impedenza elettrochimica, consiste nello studio della risposta del sistema all'applicazione di segnali periodici al variare della frequenza.

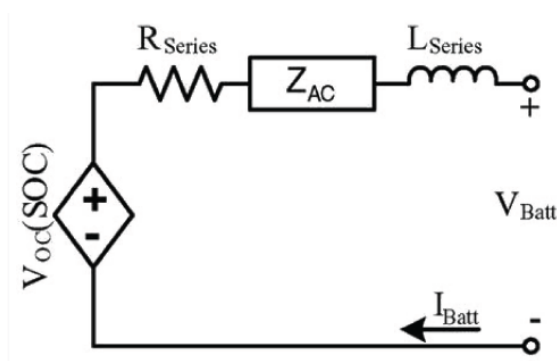


Figura 3.3: Modello elettrico della batteria basato sull'impedenza.

- i transitori di tensione che si verificano al termine e all'inizio delle fasi di carica e scarica in funzione della corrente ($C_{Transient}$, $R_{Transient}$ e $V_{C_{Rate}}(I_{Batt})$);
- la tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica e della corrente ed infine la resistenza interna ($R_{SelfDischarge}$, $C_{Capacity}$, $V_{laod}(V_{Rate})$ e I_{Batt});
- gli elettrodi di collegamento ($V_{OC}(V_{SOC})$ e R_{Series}).

Nonostante sia molto articolato, questo modello non è tuttavia in grado di rappresentare il comportamento del convertitore elettrochimico nel caso di carichi a corrente non costante.

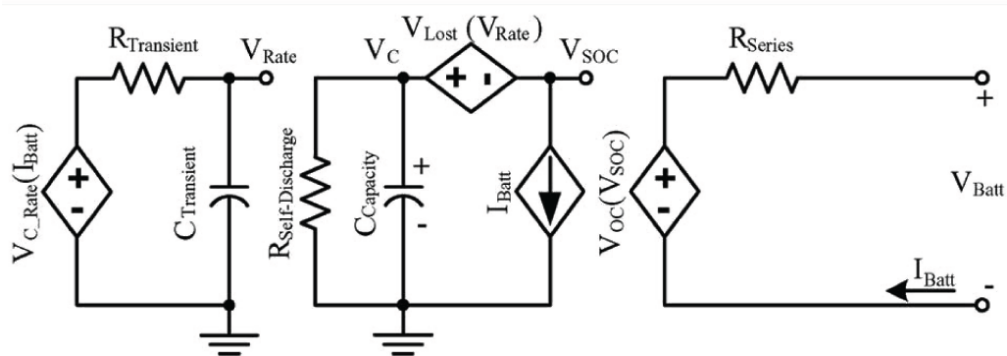


Figura 3.4: Modello elettrico della batteria run time.

Partendo da queste considerazioni in [16] è stato proposto un modello (Figura 3.5) in grado di sfruttare i punti di forza di ognuno dei tre approcci precedenti per offrire una miglior accuratezza nella stima dei valori

di tensione, corrente e del runtime. Il circuito equivalente è costituito da due sottoreti; la prima (*Battery lifetime*), ereditata dal modello basato sul runtime, descrive il livello energetico della batteria, ed è costituita da un condensatore ($C_{Capacity}$) rappresentante la capacità totale della batteria, la resistenza di autoscarica ($R_{SelfDischarge}$) e un generatore ideale di corrente pilotato posti in parallelo. La capacità della batteria dipende da numerosi fattori, tra cui la temperatura ($Temp$) e il numero di cicli di carica e scarica ($Cycle$), che vengono considerati nel dimensionamento della capacità (espressa in Coulomb) mediante due fattori di correzione (3.5).

$$C_{Capacity} = 3600 \cdot Ah \cdot f_1(Cycle) \cdot f_2(Temp). \quad (3.5)$$

La tensione ai capi del condensatore (V_{SOC}) indica lo stato di carica della batteria, ed assume il valore di 1 V quando la batteria è al massimo della carica ($SOC = 100\%$) e valore 0 V quando la batteria è completamente scarica. In questo modo, quando la batteria viene caricata o scaricata mediante la sorgente di corrente I_{Batt} , il valore di tensione cambierà dinamicamente, fornendo una misura istantanea dello stato di carica.

Come avviene per la capacità, anche il fenomeno dell'autoscarica dipende da molti fattori, come la temperatura, lo SOC e l'aging, pertanto anche la $R_{SelfDischarge}$ dovrebbe essere una funzione di tali grandezze. Tuttavia, per praticità essa viene posta ad un valore costante molto grande o, in taluni casi, eliminata se il fenomeno risulta trascurabile.

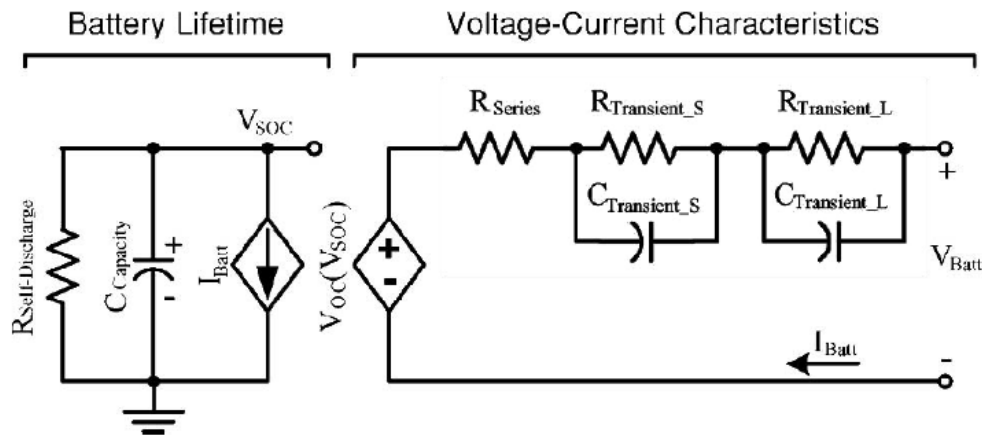


Figura 3.5: Modello elettrico proposto in [16].

La seconda sottorete (*Voltage-Current characteristic*), simile ai circuiti equivalenti basati su Thevenin, modella i transitori di tensione, ed è composta da una resistenza (R_{Series}), due coppie RC e un generatore ideale

di tensione pilotato posti in serie. Quest'ultimo rappresenta la tensione a circuito aperto (V_{OC}) che dipende dallo stato di carica della batteria, relazione rappresentata dal modello utilizzando come grandezza di controllo per il generatore V_{OC} la tensione V_{SOC} in accordo all'andamento della curva $V_{OC} - SOC$. Infine, la rappresentazione dei transistori avviene sfruttando la resistenza R_{Series} per modellare il calo istantaneo di tensione in risposta al gradino (rappresentante l'inizio e la fine della carica e della scarica) e le due reti RC parallelo per descrivere le costanti di tempo brevi ($R_{Transient_S}$ e $C_{Transient_S}$) e lunghe ($R_{Transient_L}$ e $C_{Transient_L}$). Così facendo, il modello offre il giusto trade-off tra accuratezza e complessità di calcolo come confermato in [17], dove viene presentata un'interessante implementazione dello schema equivalente ed una dettagliata descrizione della procedura di stima dei parametri.

Oltre alla scelta del modello, un ruolo fondamentale è giocato dalla corretta ed accurata determinazione dei parametri a partire dai dati sperimentali. All'aumentare del numero delle reti RC parallelo, si deve operare con sistemi di equazioni di ordine sempre più elevato, rendendo difficoltosa la determinazione dei parametri. Per ovviare a questo problema in [18] è stato proposto un metodo algebrico applicabile ad un generico modello di Thevenin dotato di n coppie RC che, effettuando alcune sostituzioni di variabili, permette di risolvere un sistema costituito da equazioni lineari e equazioni polinomiali di ordine n in una sola variabile. Ciò rende la determinazione dei parametri del modello più agevole, offrendo la possibilità di determinare i parametri di modelli di ordini diversi a partire dallo stesso set di misurazioni.

Un ulteriore approccio di identificazione dei parametri del modello è quello basato sull'ottimizzazione come presentato in [19], in cui vengono sfruttati gli algoritmi genetici per dimensionare le componenti del modello della batteria utilizzato, analogo alla parte destra dello schema in figura 3.5.

3.2 Modello realizzato

3.2.1 Analisi dei requisiti

Come precedentemente accennato, il contesto di applicazione di questo modello è quello dello studio preliminare, pertanto i dati disponibili sono limitati alle curve caratteristiche e ai principali parametri presenti sul datasheet fornito dal costruttore. Inoltre, analizzando la struttura della simulazione statica presentata in sezione 2.2, si nota che le maggiori ap-

prossimazioni nell'elaborazione del computo energetico vengono introdotte considerando *costante* la potenza di carica istantanea. Essa dipende infatti dai valori di tensione e corrente assunti dalla batteria al variare dello stato di carica che, senza un modello, non possono essere stimati. Al contrario, la potenza richiesta agli accumulatori in fase di boost può essere calcolata in maniera accurata in quanto, essendo proporzionale alla coppia erogata dal motore elettrico e dai rendimenti delle componenti elettriche (2.6), in ogni istante di simulazione sono noti i valori delle grandezze coinvolte.

Da queste considerazioni emerge quindi che il modello dovrà essere focalizzato principalmente sulla fase di ricarica, fornendo una stima accurata dei valori di tensione e corrente al variare dello stato di carica della batteria che permetta di migliorare la precisione del computo energetico finale. In aggiunta, la rappresentazione dovrà essere flessibile e facilmente configurabile, permettendo di effettuare rapidamente le analisi sulla scelta, sul dimensionamento e sulle strategie basilari di gestione della batteria che caratterizzano la fase progettuale in esame.

Sebbene il calcolo della potenza istantanea richiesta agli accumulatori in fase di boost non introduca incertezze, risulta comunque interessante poter valutare l'andamento delle grandezze che coinvolgono la batteria anche in queste circostanze. Si osserva inoltre che la corrente istantanea erogata in fase di scarica coincide con quella assorbita dal motore elettrico, pertanto in questa fase il modello dovrà rappresentare l'andamento della tensione in funzione dello stato di carica.

3.2.2 Descrizione del modello

Analizzando i dati a disposizione presentati in sezione 2.1.2, emerge come le uniche informazioni riguardanti l'andamento di tensione e corrente al variare dello stato di carica siano fornite dalle caratteristiche di carica e scarica della batteria. Inoltre, operando in fase di studio preliminare in cui non si dispone fisicamente della batteria, non è stato possibile effettuare delle prove specifiche che permettessero di ottenere i dati necessari alla realizzazione di modelli articolati come quelli presentati precedentemente. In particolare, si riscontra la mancanza di dati sufficienti a modellare i comportamenti transitori in risposta al gradino e il fenomeno dell'autoscarica che, tuttavia, non sono di particolare interesse nel contesto in esame. Lo schema elettrico equivalente del modello realizzato si riduce quindi a quello del generatore di tensione reale (Figura 3.6), costituito dalla sola resistenza interna (R_{Series}) e da un generatore ideale di tensione pilotato

($V_{OC}(SOC)$), in grado di fornire la tensione di circuito aperto al variare dello stato di carica.

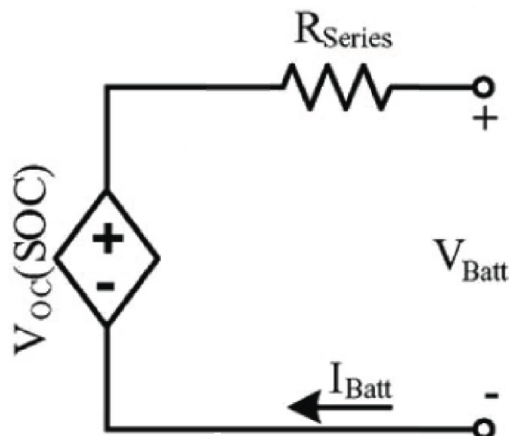


Figura 3.6: Schema elettrico del modello realizzato.

Osservando le curve caratteristiche (Figura 2.5 e Figura 2.6), si nota che esse riportano l'andamento delle grandezze della batteria ai poli al variare dello stato di carica ($V_{Batt}(SOC)$). Per la realizzazione del modello della batteria si è quindi seguito un approccio simile a quello presentato in [14], sfruttando le curve caratteristiche per ottenere due mappe che ne descrivano l'andamento. Da esse, sfruttando la procedura di *fitting polinomiale*, vengono inoltre ricavate due funzioni, che permettono di ottenere una descrizione diretta dell'andamento della tensione ai poli. Essendo applicato ad un contesto di studio preliminare, il modello opera nelle ipotesi che le variazioni di temperatura da quella di riferimento siano nulle (facilmente introducibili con la procedura presentata in [13]) e trascurando le perdite di carica dovute alle reazioni chimiche interne alla batteria.

Modellazione della fase di ricarica

Osservando la caratteristica in figura 2.5 si nota che essa riporta l'andamento della tensione e della corrente ai poli per le varie strategie di ricarica in funzione del tempo e non in funzione dello stato di carica come richiesto. Sfruttando i valori istantanei delle due grandezze riportate e trascurando le dissipazioni dovute ai fenomeni elettrochimici interni, è possibile calcolare la potenza istantanea di carica (3.6)

$$P_C(t) = v_{Batt}(t) \cdot i_{Batt}(t) - R_{Series} \cdot i_{Batt}(t), \quad (3.6)$$

e da essa l'energia disponibile nella batteria (3.7) ed effettivamente utilizzabile considerando il limite minimo di tensione (V_{cutoff}),

$$E_C(t) = \int_0^t (P_C(t) - V_{cutoff} \cdot i_{Batt}(t)) dt, \quad (3.7)$$

con $v_{Batt}(t)$ e $i_{Batt}(t)$ funzioni polinomiali rappresentanti le curve caratteristiche per la strategia di ricarica scelta.

Come intuibile, mettendo in relazione quest'ultima, normalizzata rispetto al valore massimo (valore al termine della carica), con la tensione e corrente dei corrispondenti istanti, si ottengono le curve tensione-SOC e corrente-SOC desiderate.

Quest'ultima risulta essere molto importante per la simulazione della fase di carica della batteria in quanto, come si può notare dalla caratteristica di riferimento (Figura 2.5), essa è suddivisa in due parti in cui si notano comportamenti differenti. Inizialmente la ricarica avviene infatti a corrente costante (I_{Charge}), in cui si osserva un incremento della tensione ai poli fino al raggiungimento del valore massimo, attorno a cui si stabilizza, dando inizio alla fase finale in cui si osserva un rapido decremento della corrente assorbita dalla batteria che si annulla al raggiungimento della massima carica. La capacità del modello di simulare questo comportamento è quindi di fondamentale importanza, in quanto esso deve essere gestito dal BMS per evitare pericolosi sovraccarichi della batteria in fase di ricarica.

Con riferimento allo schema equivalente in figura 3.6, la tensione e la corrente ai capi della batteria sono rappresentate dalle seguenti funzioni:

$$V_{Batt}(SOC) = \begin{cases} f v_{carica}(SOC) & \text{se } SOC < SOC_{Switch} \\ V_{maxCarica} & \text{se } SOC \geq SOC_{Switch} \end{cases}, \quad (3.8)$$

$$I_{Batt}(SOC) = -1 \cdot \begin{cases} I_{carica} & \text{se } SOC < SOC_{Switch} \\ f i_{carica}(SOC) & \text{se } SOC \geq SOC_{Switch} \end{cases}, \quad (3.9)$$

con SOC_{Switch} stato di carica in corrispondenza del quale inizia la fase finale della ricarica, $V_{maxCarica}$ tensione di massima carica, I_{carica} corrente di carica costante, $f v_{carica}(SOC)$ funzione descrivente la tensione ai poli al variare dello stato di carica e $f i_{carica}(SOC)$ funzione descrivente la corrente entrante ai poli al variare dello stato di carica. Similmente a quanto avviene in [13], queste ultime vengono ricavate mediante la

procedura di fitting polinomiale delle curve tensione-SOC e corrente-SOC precedentemente ricavate e sono esprimibili tramite i seguenti polinomi:

$$fv_{carica}(SOC) = \sum_0^k v_k \cdot SOC^k, \quad (3.10)$$

$$fi_{carica}(SOC) = \sum_0^m i_m \cdot SOC^m. \quad (3.11)$$

Modellazione della fase di scarica

Al contrario di quanto avviene nella fase di ricarica, per la fase di scarica la curva caratteristica fornita dal costruttore non richiede particolari elaborazioni, in quanto esprime l'andamento della tensione ai poli in funzione dello stato di scarica. Per questo motivo, nell'ipotesi che il carico abbia un assorbimento di corrente costante del tipo $k \cdot C$, la mappa che rappresenta la scarica della batteria coincide con una delle caratteristiche fornite dal costruttore, o è ricavabile da esse. Per ottenere la funzione che descrive l'andamento della tensione ai poli al variare dello stato di scarica, è sufficiente applicare la procedura di fitting polinomiale alla curva di scarica di riferimento(3.12)

$$fv_{scarica}(SOD) = \sum_0^k v_k \cdot SOD^k, \quad (3.12)$$

dove $SOD = 1 - SOC$. In fase di scarica la tensione ai poli al variare dello stato di carica sarà data quindi dalla seguente (3.13)

$$V_{Batt}(SOC) = fv_{scarica}(1 - SOC). \quad (3.13)$$

3.3 Introduzione del modello

In questa sezione verranno presentate le modifiche introdotte alla simulazione statica esistente e le problematiche incontrate nell'introduzione del modello della batteria precedentemente descritto. Come intuibile dalle considerazioni precedenti, l'area di intervento è stata quella del calcolo e dell'elaborazione degli intervalli di carica, in cui si sono concentrate la maggior parte delle modifiche. Sfruttando la preelaborazione delle energie dissipate in fase di boost, il blocco in esame ad ogni passo ricalcola il livello energetico della batteria, ottenendo quindi lo stato di carica istantaneo, necessario all'applicazione del modello precedentemente illustrato.

Ciò introduce la problematica della stima dello stato di carica della batteria al passo di campionamento successivo (secondo la struttura anticausale del software) in quanto la tensione e la corrente ai poli risultano variabili all'interno dell'intervallo di campionamento, causando una continua variazione della potenza di carica. Risulta quindi fondamentale avere una stima affidabile della potenza di carica all'istante di campionamento successivo che permetta, sfruttando l'integrazione trapezoidale, di calcolare l'energia immessa nella batteria nell'intervallo di campionamento $[kT_c, (k+1)T_c]$ (Figura 3.7). Da essa sarà quindi possibile calcolare lo stato di carica della batteria al termine dell'intervallo in esame (somma dell'area scura e di quella chiara), che verrà utilizzato per l'applicazione del modello della batteria ai passi successivi.

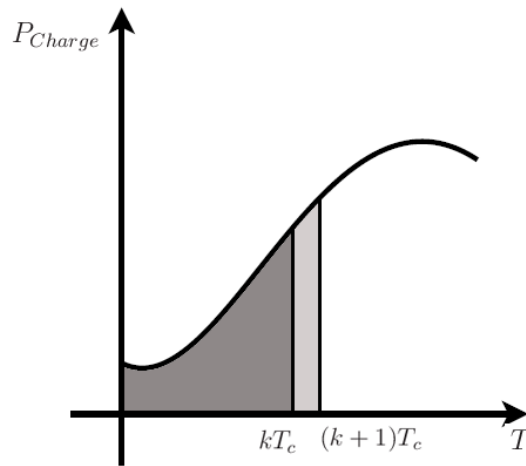


Figura 3.7: Stima dello stato di carica.

Inoltre, disponendo della simulazione del comportamento della batteria nelle fasi finali della ricarica, è stato introdotto un controllo *ideale* della ricarica che, sfruttando la stima della potenza di carica, permette di regolare la corrente immessa nella batteria evitandone il danneggiamento. Per consentire il confronto delle analisi precedenti con quelle svolte dopo l'introduzione del modello della batteria e mantenere la visualizzazione degli eccessi di energia, è stata introdotta la possibilità di mantenere costante la corrente immessa nella batteria, disabilitando quindi la nuova funzionalità. L'algoritmo 1 riassume quanto presentato in questa sezione, riportando la struttura del blocco in esame.

In aggiunta, avendo a disposizione i valori istantanei di tensione ai poli sia in fase di carica che di scarica e la corrente immessa nella batteria

Algoritmo 1 Elaborazione degli intervalli di carica.

```

for  $t \leftarrow t_{start}$  to  $t_{end}$  step  $T_c$  do
  /* Elaborazione della scarica della batteria */
  if boost then
     $batteyEnergy(t) \leftarrow batteyEnergy(t - 1) - energyBoost(t)$ 
     $v_{Batt}(t) \leftarrow V_{Batt}(batteryEnergy(t)/maxEnergy)$ 
    if  $batteryEnergy(t) < minEnergy$  then
       $batteryEnergy(t) \leftarrow 0$ 
    end if
    /* Mantenimento energia */
  else
    if  $\neg charge$  then
       $batteyEnergy(t) \leftarrow batteyEnergy(t - 1)$ 
       $v_{Batt}(t) \leftarrow v_{Batt}(t - 1)$ 
    end if
    /* Elaborazione della ricarica della batteria */
  else
     $v_{Batt}(t) \leftarrow V_{Batt}(batteryEnergy(t)/maxEnergy)$ 
    if chargeControl then
       $i_{Batt}(t) \leftarrow I_{Batt}(batteryEnergy(t)/maxEnergy)$ 
    else
       $i_{Batt}(t) \leftarrow I_{carica}$ 
    end if
     $P_{carica}(t) \leftarrow v_{Batt} \cdot i_{Batt} \cdot celle$ 
    if ( $chargeControl \vee \neg chargeControl \wedge (v_{Batt}(t) < V_{maxCarica})$ )
    then
       $P_{carica}(t + 1) \leftarrow \text{Stima della potenza di carica}(P_{Charge}(t))$ 
    else
       $P_{carica}(t + 1) \leftarrow V_{maxCarica} \cdot I_{carica} \cdot celle$ 
    end if
     $dE \leftarrow (P_{carica}(t) + P_{carica}(t + 1)) \cdot T_c/2$ 
     $batteryEnergy(t + 1) \leftarrow batteryEnergy(t) + dE$ 
    if ( $batteryEnergy(t + 1) > maxEnergy$ ) then
       $batteryEnergy(t + 1) \leftarrow maxEnergy$ 
    end if
  end if
end for

```

lungo l'intero ciclo di guida, è stata aggiunta la visualizzazione di tali dati, mettendo in evidenza l'eventuale attivazione del controllo della ricarica.

3.3.1 Stima della potenza di carica

Il problema di stima della potenza di carica è risolvibile applicando un approccio simile a quello seguito nella realizzazione del modello della batteria in fase di ricarica. Sfruttando le curve di carica messe a disposizione dal costruttore (Figura 2.5) e la (3.6) è infatti possibile ricavare l'andamento della potenza di carica in funzione del tempo per le varie strategie di ricarica. Questa funzione risulta quindi essere la parte fondamentale dello stimatore che, come intuibile, non potrà disporre dello stato di carica in quanto dipendente dalla grandezza da stimare. Disponendo della sola potenza di carica istantanea e della tensione ai poli, un semplice stimatore è dato dalla seguente (3.14):

$$P_{carica}((k+1)T_c) = \begin{cases} \min(P_{camp}(sT_c) > P_{carica}(kT_c)) & \text{se } V_{Batt}(kT_c) < V_{maxCarica} \\ \max(P_{camp}(sT_c) < P_{carica}(kT_c)) & \text{se } V_{Batt}(kT_c) \geq V_{maxCarica} \end{cases}, \quad (3.14)$$

con P_{camp} vettore contenente il campionamento della caratteristica potenza di carica-tempo per la strategia di carica desiderata. Quest'ultima è inizialmente caratterizzata da un andamento crescente, dipendente dalla tensione ai poli, che, al raggiungimento della tensione massima, diventa decrescente, seguendo il trend della corrente. Sfruttando la tensione ai poli è quindi possibile discriminare questo andamento, permettendo di effettuare correttamente la stima in entrambe le fasi di ricarica. Analizzando lo stimatore si nota che nel caso in cui la potenza istantanea ($P_{carica}(kT_c)$) non coincida con uno dei valori campionati ($P_{camp}((s-1)T_c) < P_{carica}((k+1)T_c) < P_{camp}(sT_c)$), la stima della potenza di carica al passo successivo sarà sottostimata (nel caso della fase iniziale della ricarica) o sovrastimata (nella parte finale della ricarica) con il valore assunto all'istante di simulazione $(k+1)T_c - \epsilon$ con $0 \leq \epsilon < T_c$. L'incaccuratezza introdotta da questo fenomeno risulta tuttavia trascurabile, in quanto nel contesto in esame i tempi di campionamento risultano essere molto ridotti ($T_c \ll 1s$), fornendo una discretizzazione della curva potenza di carica - tempo molto densa.

Un secondo approccio per la realizzazione dello stimatore, che permette di eliminare i problemi dovuti al campionamento, è quello di sfruttare la procedura di fitting polinomiale per ottenere una funzione che descriva la curva di riferimento (3.15) e la sua inversa che consenta di trovare l'istante

temporale corrispondente a ciascun valore di potenza (3.16).

$$Pt_{carica}(t) = \sum_0^i t_i \cdot SOC^i. \quad (3.15)$$

$$tP(P_{carica}) = \sum_0^j p_j \cdot SOC^j. \quad (3.16)$$

Disponendo della potenza di carica attuale $P_{carica}(kT_c)$ è quindi possibile risalire al corrispondente istante temporale nella curva di riferimento (t) e da esso alla potenza al tempo ($t + T_c$) che coinciderà quindi con la stima desiderata (3.17)

$$\begin{aligned} P_{carica}((k+1)T_c) &= Pt_{carica}(t + T_c), \\ &\text{con} \\ t &= tP(P_{carica}((k-1)T_c)). \end{aligned} \quad (3.17)$$

Analizzando le prestazioni ottenute da questi due approcci, si nota che esse risultano essere molto simili; il secondo approccio è tuttavia preferibile nelle applicazioni real time in quanto, fornendo una rappresentazione diretta della grandezza da stimare, permette di contenere il tempo di elaborazione. Nel primo approccio le prestazioni sono infatti vincolate dalla bontà della funzione di ricerca all'interno del vettore che rappresenta il campionamento della curva, che in generale risulta superiore al tempo impiegato per effettuare la valutazione del polinomio.

3.3.2 Implementazione

Dopo aver presentato gli algoritmi utilizzati per effettuare l'upgrade della simulazione statica esistente, in questa sezione verranno brevemente descritte le scelte implementative intraprese nella loro realizzazione e un riepilogo delle funzioni realizzate. Per ulteriori dettagli si rimanda all'appendice A in cui vengono riportati i codici sorgente. Le funzioni che realizzano il sistema precedentemente descritto sono suddivisibili in:

- *funzioni di preelaborazione*: vengono eseguite nel blocco di inizializzazione dei dati all'avvio della simulazione effettuando il calcolo e l'inizializzazione di tutte le variabili e le strutture dati aggiuntive utilizzate dal modello e dalle nuove funzionalità;
- *funzioni di calcolo*: vengono richiamate ad ogni istante di simulazione ed implementano il modello della batteria ed alcune funzionalità di controllo.

Funzioni di preelaborazione

- **getChargePol**: elabora le curve caratteristiche di tensione e corrente di carica, fornite separatamente, restituendo i polinomi che ne descrivono l'andamento, la massima energia utilizzabile, l'energia al termine della prima fase di carica ed i vettori contenenti il campionamento della curva di potenza nella prima e nell'ultima parte della carica. La scelta implementativa è stata dettata dalla maggior praticità nella realizzazione dello stimatore che sfrutta tali strutture. Nel calcolo della potenza disponibile viene inoltre trascurata la resistenza interna, che risulta essere infinitesima non provocando quindi sensibili perdite energetiche.
- **getDischargePol**: elabora la curva caratteristica di tensione corrispondente alla corrente media richiesta dal motore elettrico ($I_{scarica}$), restituendo il polinomio che ne descrive l'andamento e la massima capacità della batteria espressa in Ah.
- **getPowerPol**: elabora le curve caratteristiche di tensione e corrente di carica, fornite separatamente, restituendo il tempo di fine ricarica, il tempo al raggiungimento della massima tensione ai poli ed i polinomi che descrivono l'andamento della potenza di carica nella fase iniziale e finale di ricarica e i loro inversi. Anche in questo caso, la gestione separata delle due fasi di ricarica è dettata dalla maggior praticità nella realizzazione dello stimatore.

Funzioni di calcolo

- **getChargeVoltage**: implementa la funzione $V_{Batt}(SOC)$ (3.8), sfruttando il polinomio che descrive l'andamento della tensione ai poli in funzione dell'energia e il livello energetico al termine della prima fase di carica calcolati dalla funzione **getChargePol**. Per semplicità e per evitare manipolazioni superflue dei dati si è deciso di utilizzare il livello energetico della batteria come indice del livello di carica, mantenuta anche nelle funzioni seguenti.
- **getChargeCurrent**: implementa la funzione $f_{i_{carica}}(SOC)$ (3.9), sfruttando il polinomio che descrive l'andamento della corrente ai poli in funzione dell'energia e il livello energetico massimo calcolati dalla funzione **getChargePol**.
- **getDischargeVoltage**: implementa la funzione $V_{Batt}(SOC)$ (3.13), sfruttando il polinomio che descrive l'andamento della tensione ai

poli in fase di scarica e la massima capacità in Ah della batteria calcolati dalla funzione `getDischargePol`. Per evitare la rielaborazione della caratteristica di scarica, che utilizza lo stato di scarica espresso in Ah, la funzione effettua la conversione dello stato di carica nel corrispondente valore di scarica in Ah, rendendo trasparente all'utente questa differenza di rappresentazione.

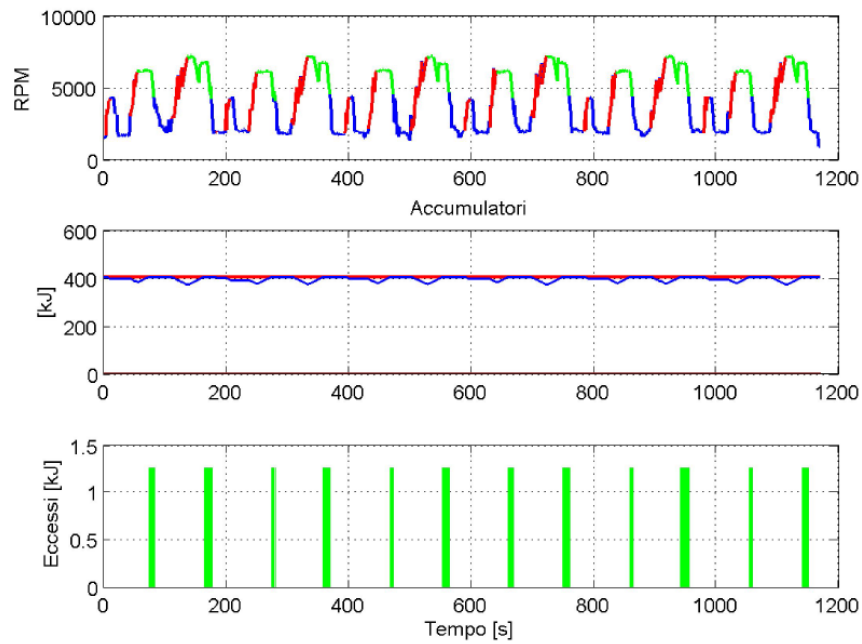
- `getTimePower`: implementa la funzione $tP(P_{carica})$ (3.16) nella fase di carica a corrente costante, sfruttando il corrispondente polinomio che descrive il tempo in funzione della potenza restituito dalla funzione `getPowerPol`.
- `getPower`: implementa la funzione $P_{t_{carica}}(t)$ (3.15) nella fase di carica a corrente costante, sfruttando il corrispondente polinomio che descrive la potenza in funzione del tempo restituito dalla funzione `getPowerPol`.
- `getTimePowerI`: implementa la funzione $tP(P_{carica})$ (3.16) nella fase di carica a tensione costante (al termine della ricarica), sfruttando il corrispondente polinomio che descrive il tempo in funzione della potenza restituito dalla funzione `getPowerPol`.
- `getPowerI`: implementa la funzione $tP(P_{carica})$ (3.15) nella fase di carica a tensione costante, sfruttando il corrispondente polinomio che descrive il tempo in funzione della potenza restituito dalla funzione `getPowerPol`.

3.4 Risultati

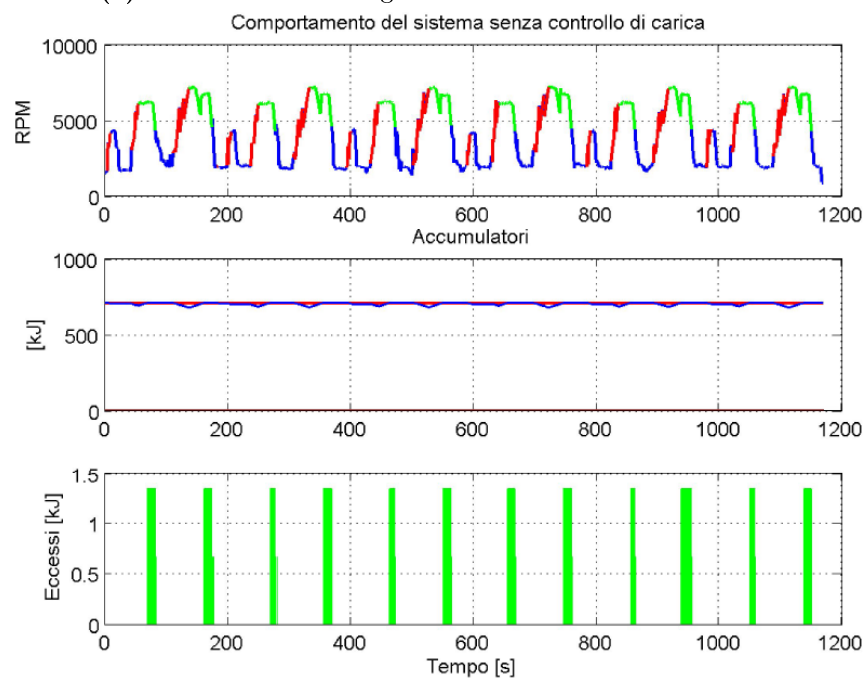
Si presentano ora i risultati ottenuti sul ciclo WMTC dopo l'aggiornamento della simulazione statica con il modello della batteria precedentemente descritto, utilizzando 4 celle e una strategia di ricarica a $2C$. Comparando i grafici forniti dalla simulazione con (Figura 3.10a e 3.11a) e senza rappresentazione della batteria (Figura 3.8a e 3.11a) sul ciclo WMTC (senza controllo di carica) si osserva come la maggior accuratezza nella determinazione dell'energia disponibile accentui gli eccessi di carica (Figura 3.8) e riduca la profondità dei picchi in fase di scarica (Figura 3.9), accentuando la permanenza dello stato di carica sul valore massimo. Ciò è dovuto al fatto che la fase di ricarica a tensione costante ha inizio quando lo SOC è all'incirca al 90%, abbondantemente superato nella simulazione, portando quindi ad un aumento della tensione di carica che, mantenendo la corrente di carica al valore massimo (80A), porta ad un aumento della potenza

di carica istantanea rispetto a quella media considerata nella precedente versione della simulazione.

Si nota tuttavia che nella fase finale della ricarica è necessario gestire correttamente la riduzione della corrente assorbita dalla batteria, pertanto si è proceduto a confrontare i risultati ottenuti dalla nuova simulazione statica con e senza controllo di carica. Osservando i grafici riportati in Figura 3.10 si osserva come l'introduzione del controllo di carica elimini completamente gli eccessi energetici (Figura 3.10b) rispetto alla medesima simulazione effettuata sul ciclo WMTC con questa funzionalità disabilitata (Figura 3.10a) evidenziando inoltre una sensibile variazione nell'andamento dello stato di carica (Figura 3.11). Si osserva infatti che la modellazione della parte finale della carica impedisce il raggiungimento del massimo livello di carica al termine del ciclo di guida, sebbene esso rimanga abbondantemente superiore al 90% (Figura 3.11b). Ciò è dovuto al rapido decadimento della corrente assorbita dalla batteria nella parte finale della ricarica, coincidente con il punto di lavoro della simulazione ($SOC > 90\%$), che riduce sensibilmente la potenza di carica e conseguentemente la quantità di energia immessa in questa fase (Figura 3.12). Analizzando l'andamento della corrente di cella (Figura 3.12b) si nota infatti che essa è notevolmente inferiore al valore massimo, che viene gradualmente avvicinato con il decrescere dello SOC. Per completezza è stato inoltre riportato l'andamento della tensione ai poli in fase di carica e di scarica, il cui andamento discontinuo è causato dalla mancata modellazione della risposta al gradino (*revamping*). Da queste considerazioni emerge quindi che il vincolo di piena carica della batteria al termine del ciclo di guida risulta essere difficilmente raggiungibile, rendendo tuttavia accettabile $SOC > 90\%$.

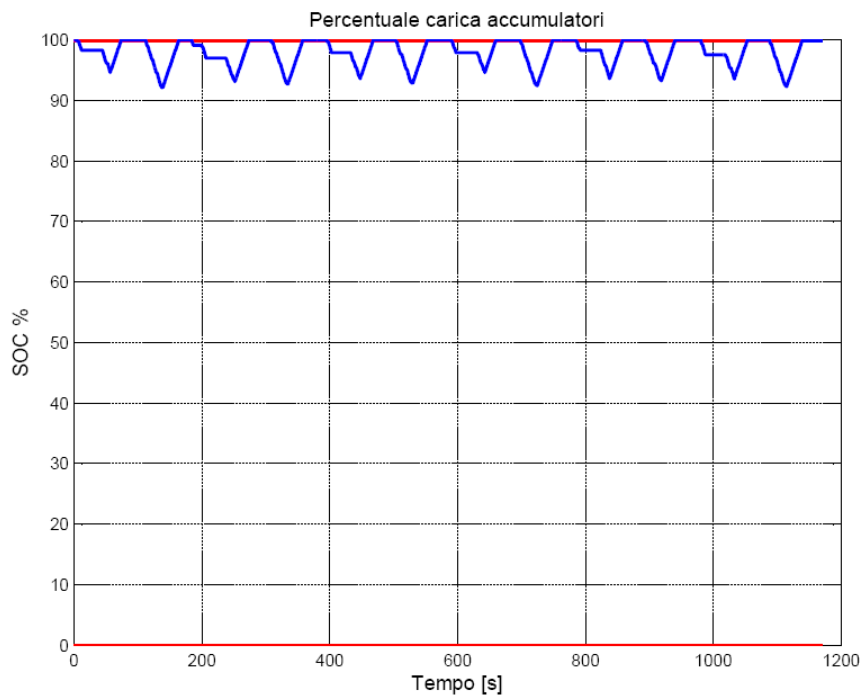


(a) SOC ed eccessi energetici senza modello della batteria

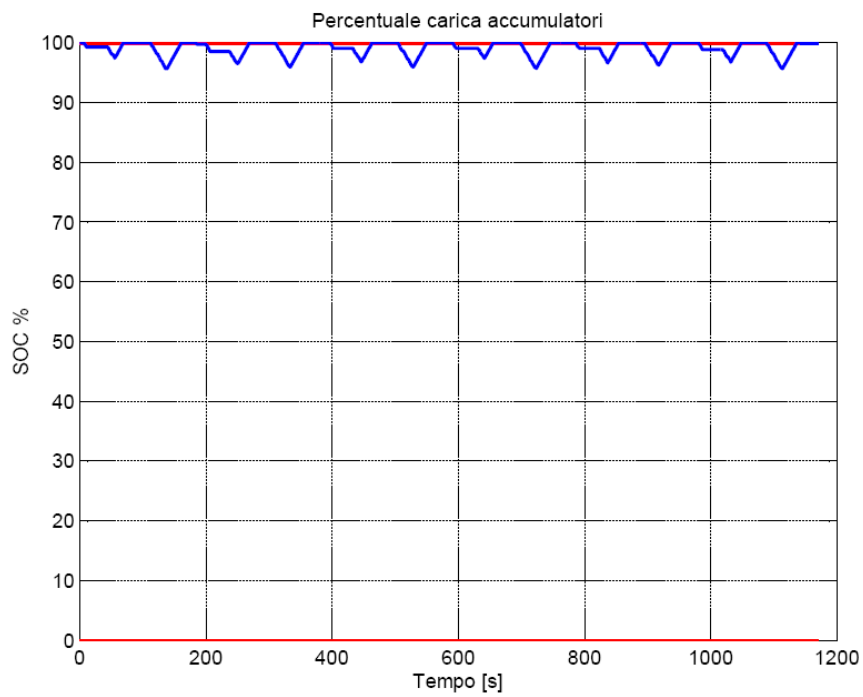


(b) SOC ed eccessi energetici con modello della batteria

Figura 3.8: SOC della batteria nel ciclo WMTC prima (a) e dopo (b) l'introduzione del modello della batteria.

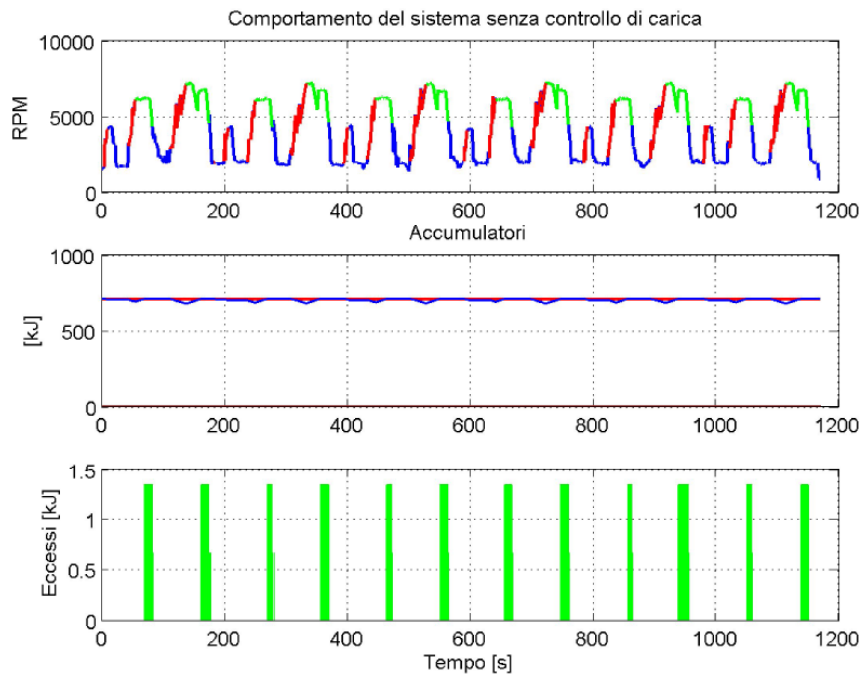


(a) SOC senza modello della batteria

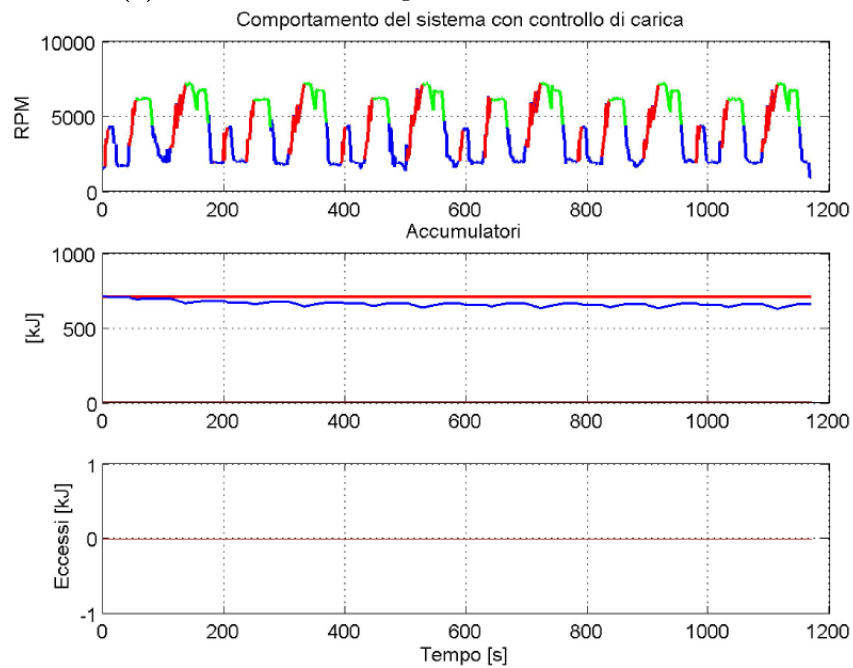


(b) SOC con modello della batteria

Figura 3.9: SOC ed eccessi energetici della batteria nel ciclo WMTC prima (a) e dopo (b) l'introduzione del modello della batteria.

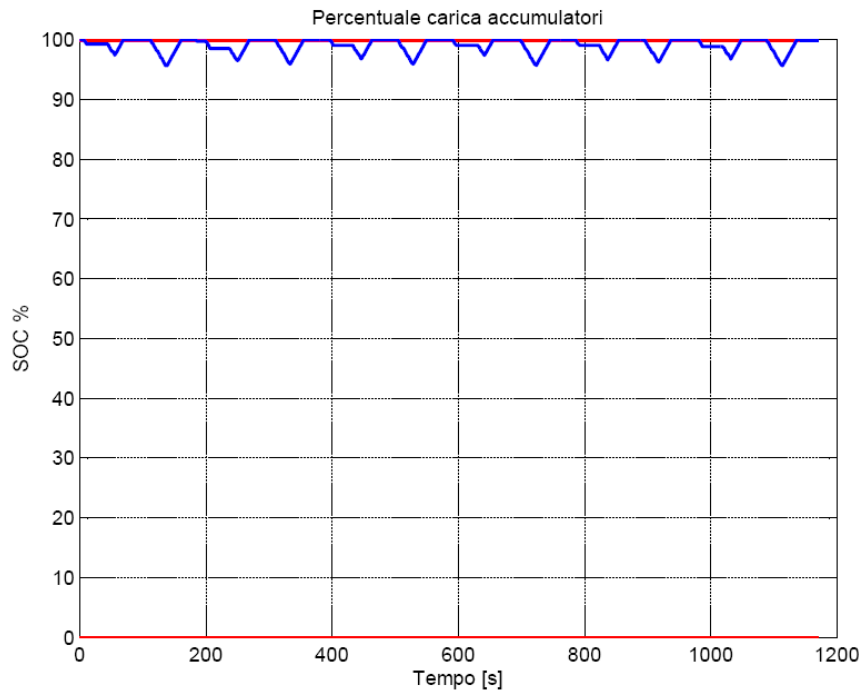


(a) SOC ed eccessi energetici senza controllo di carica

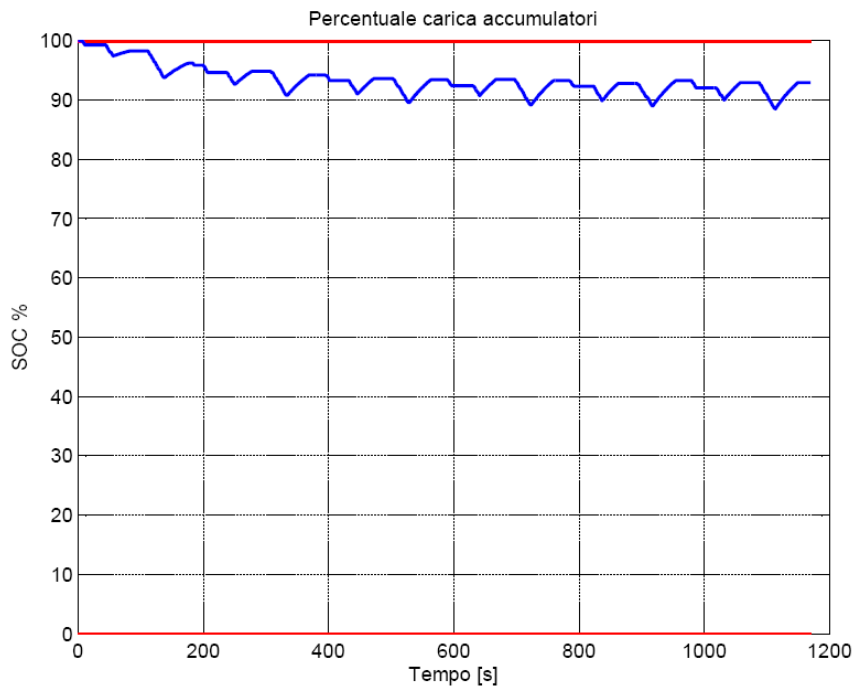


(b) SOC ed eccessi energetici con controllo di carica

Figura 3.10: SOC ed eccessi energetici della batteria nel ciclo WMTC senza (a) e con (b) controllo di carica.

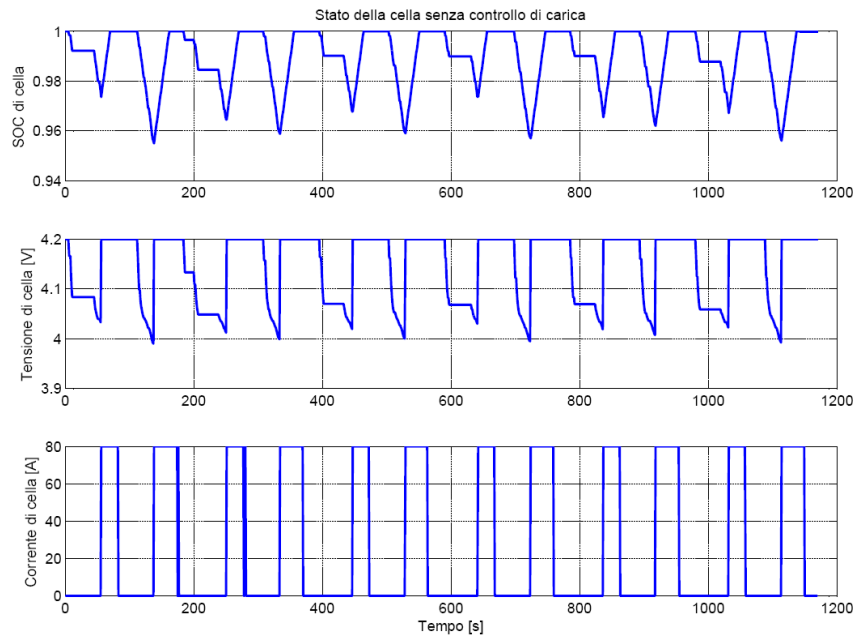


(a) SOC senza controllo di carica

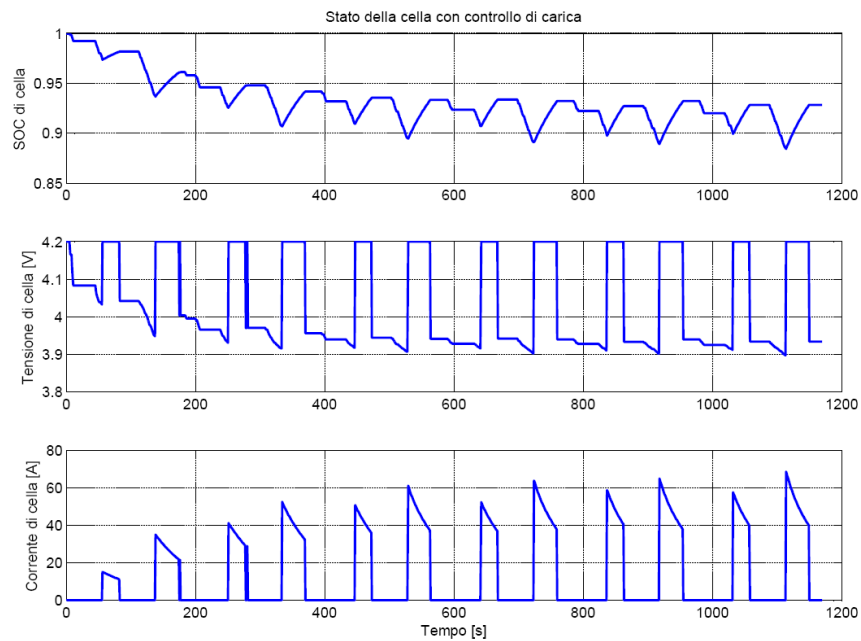


(b) SOC con controllo di carica

Figura 3.11: SOC della batteria nel ciclo WMTC senza (a) e con (b) controllo di carica.



(a) SOC, tensione e corrente di carica della cella senza controllo di carica



(b) SOC, tensione e corrente di carica della cella con controllo di carica

Figura 3.12: SOC, tensione e corrente di carica della cella nel ciclo WMTC senza (a) e con (b) controllo di carica.

Simulazione dinamica

In questa sezione verrà presentato nel dettaglio l'ambiente di *virtual prototyping* realizzato. Nello specifico verranno illustrati il tool VI-BikeRealTime, l'analisi dei requisiti, la simulazione dinamica realizzata a partire da esso ed i risultati ottenuti.

4.1 VI-BikeRealTime

Come precedentemente accennato, per la realizzazione della simulazione dinamica, è stato utilizzato il software di simulazione VI-BikeRealTime realizzato dall'azienda Vi-grade [20], che ha sviluppato una propria gamma di software specifici per la guida sportiva di automobili e motociclette tra cui VI-BikeRealTime.

Quest'ultimo è un ambiente di modellazione, post processing e analisi real-time per motociclette che permette ai progettisti, agli analisti e agli ingegneri di pista di effettuare analisi dettagliate considerando tutti gli aspetti riguardanti il veicolo, il tracciato ed il pilota. Sfruttando una interfaccia grafica (Figura 4.1), il software permette di definire il modello della motocicletta, che viene suddiviso in vari sottosistemi in modo da facilitarne la gestione e la parametrizzazione.

Sfruttando degli appositi database è possibile modellare le principali componenti di ciascun sottosistema (forcella, ammortizzatori, motore, ecc) potendone variare le impostazioni direttamente dall'interfaccia grafica (precarico, rapporti del cambio, ecc). I sottosistemi in cui viene suddivisa la motocicletta sono il telaio, le sospensioni anteriori e posteriori, le ruote, il cambio, l'aerodinamica e il motore, suddivisione mantenuta anche nella gestione dei segnali di output forniti (351). È inoltre possibile eseguire una simulazione di una manovra (accelerazione) o di uno o più

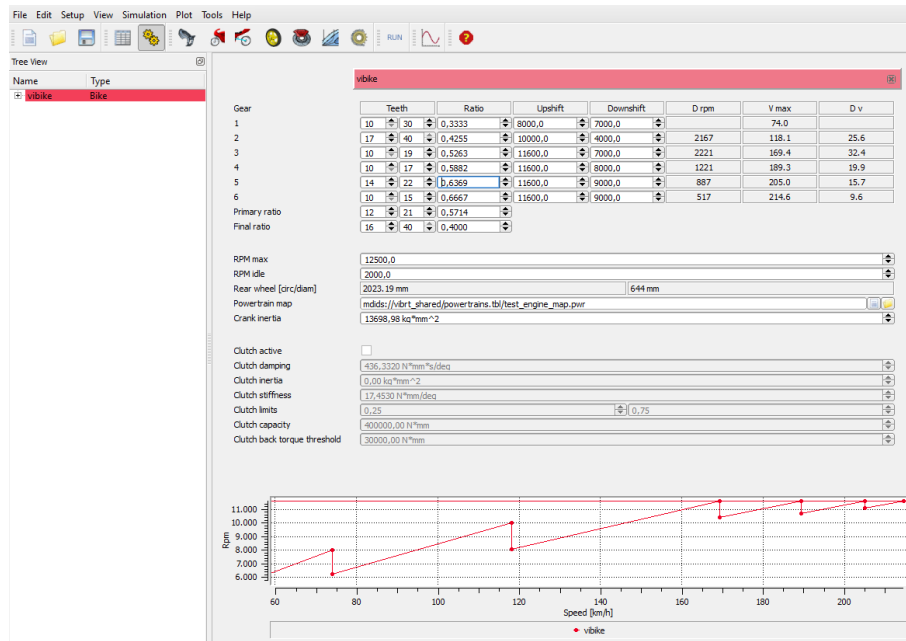


Figura 4.1: Interfaccia grafica VI-BikeRealTime.

giri di pista, e successivamente analizzare le telemetrie mediante l'apposita interfaccia di visualizzazione e selezione dei dati (Figura 4.2) che possono essere salvati per analisi future. Il software implementa infatti un pilota virtuale che, sfruttando un file di configurazione contenente la mappa delle velocità in ogni punto della manovra, guida la moto modellata lungo il tracciato secondo le impostazioni fornite, permettendo di verificarne il comportamento al variare del setting delle componenti di interesse.

Grazie ad una specifica implementazione MatLab Simulink, VI-Bike RealTime permette inoltre di realizzare attività di tipo *software in the loop* e *hardware in the loop*, consentendo di sviluppare i sistemi di controllo in ambiente puramente emulativo e, una volta validati, di testare il comportamento dell'unità di controllo reale (*ECU*) collegandola alla moto virtuale.

4.2 Analisi requisiti

Come precedentemente accennato, il software di simulazione esistente non consente di effettuare analisi approfondite sugli effetti derivanti dall'introduzione della macchina elettrica sul motociclo. Ciò risulta tuttavia molto importante per verificare eventuali criticità nel momento di erogazione del

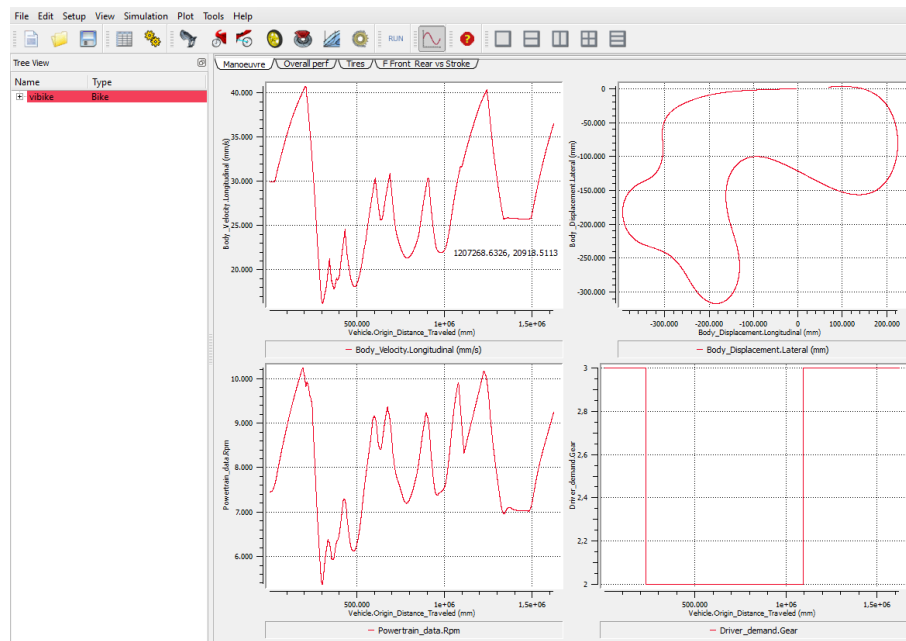


Figura 4.2: Interfaccia grafica VI-BikeRealTime.

boost e le effettive ripercussioni sul pilota e sulla guida. Non potendo effettuare tali confronti, con la simulazione statica non è possibile sviluppare e confrontare sistemi di controllo e strategie di intervento efficienti della macchina elettrica, evidenziando la necessità di disporre di una simulazione *dinamica* che faciliti le operazioni di virtual prototyping.

Da queste considerazioni emerge che l'ambiente simulativo da realizzare dovrà modellare i principali aspetti del motociclo ibrido in tempo reale, garantendo al contempo flessibilità e integrabilità. Inoltre, per garantire un'elevata fruibilità, la simulazione dovrà garantire buone prestazioni in termini di sforzo computazionale, limitando i tempi di elaborazione, e rendere disponibili i principali dati telemetrici per le successive analisi in post processing.

Per facilitare l'utilizzo dell' ambiente simulativo, risulta interessante disporre di un'interfaccia grafica che permetta di impostare le principali variabili del modello, come ad esempio il numero di celle, consentendo la modifica di alcune di esse in tempo reale. Quest' ultimo aspetto risulta molto importante per lo sviluppo ed il testing di funzionalità attivabili dal pilota durante la guida, come ad esempio il cambio della mappatura del boost di coppia. In aggiunta, risulta interessante disporre di un' interfaccia

grafica in grado di fornire le in tempo reale le principali informazioni sullo stato del veicolo, come ad esempio la posizione sul tracciato, lo SOC, gli rpm, la velocità e le principali impostazioni del sistema di controllo.

4.3 Sviluppo del modello Simulink

Come precedentemente accennato, l'ambiente di virtual prototyping è stato sviluppato con l'ausilio di MatLab Simulink, realizzando uno specifico modello che prevede l'integrazione del tool VI-BikeRealTime con delle specifiche componenti realizzate ad hoc. Prima di presentare il modello Simulink realizzato, vengono illustrati alcuni punti fondamentali del processo di sviluppo seguito.

4.3.1 Fasi di sviluppo e milestone

Dopo aver realizzato e testato il modello della motocicletta utilizzata per la realizzazione del prototipo secondo le specifiche riportate in sezione 2.1.1, si è inizialmente proceduto all'integrazione del tool fornito da VI-grade con dei blocchi che rispecchiassero le logiche di funzionamento della simulazione statica. In questo modo è stato infatti possibile verificare eventuali problemi nella realizzazione della cosimulazione con VI-BikeRealTime e disporre di un primo modello basilare con cui effettuare delle analisi di massima sulla stabilità del veicolo durante l'erogazione del boost di coppia. Per garantire delle buone prestazioni in termini di tempo di elaborazione, si è deciso, dopo delle verifiche preliminari, di realizzare i blocchi aggiuntivi mediante funzioni matlab (successivamente compilate). In questo modo, oltre a garantire maggior confrontabilità con la simulazione statica, è possibile migliorare la manutenibilità e la comprensibilità del modello, in particolare per quanto riguarda le logiche di attivazione del boost e della ricarica. La cosimulazione inizialmente sviluppata (Figura 4.3) è composta, oltre che dal tool VI-BikeRealTime, dai blocchi che simulano la batteria (*battery*), la macchina elettrica (*electric motor*) e l'attivazione di quest ultima nelle due modalità previste (*boost/charge activation*), descritti nel proseguo.

Interazione di VI-BikeRealTime

Il tool VI-BikeRealTime (cerchio rosso in Figura 4.3) è costituito da tre blocchi che rappresentano gli input, il core del software e gli output. Il primo, suddiviso nei vari sottosistemi precedentemente elencati e in un ulteriore sottosistema contenente le richieste del pilota, offre un punto di

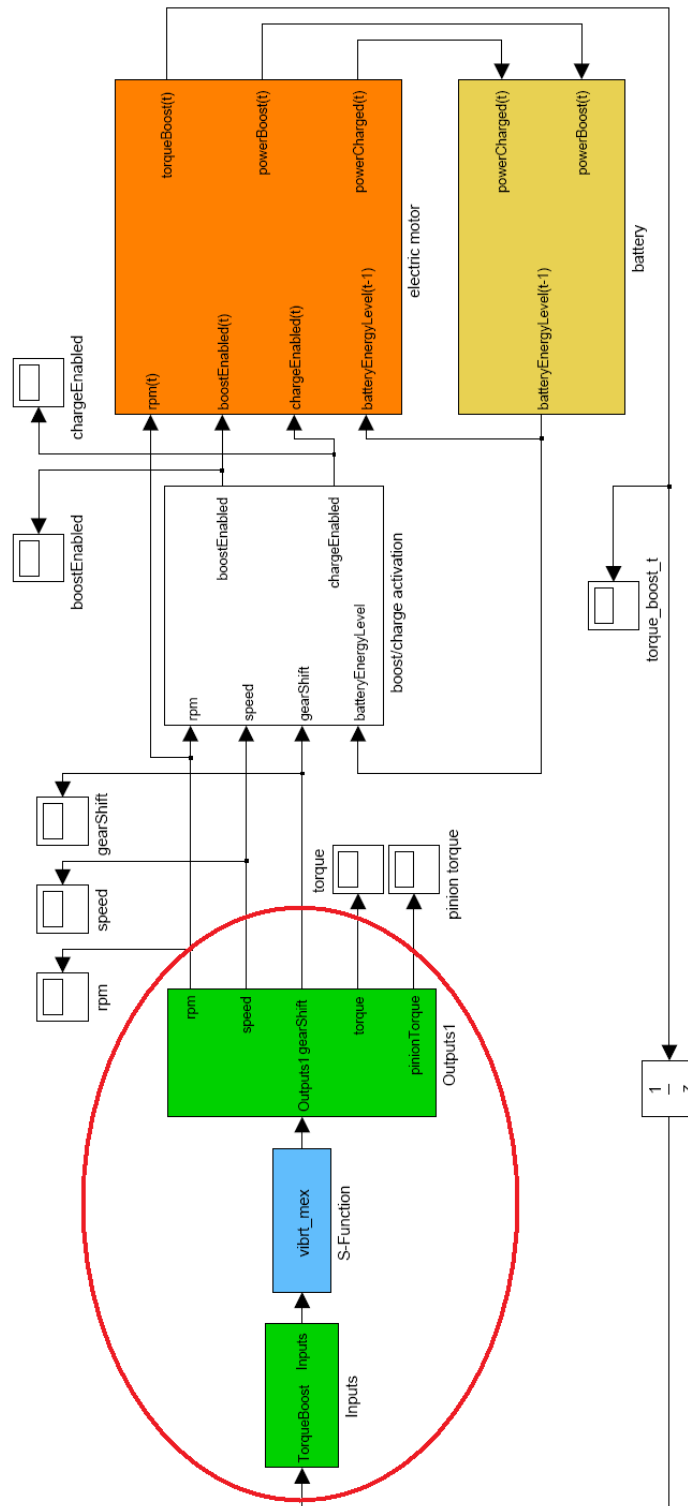


Figura 4.3: Modello Simulink della cosimulazione iniziale.

accesso al core del tool permettendo quindi di variare i parametri, di simulare esternamente l'intero sottosistema e di inserire le grandezze calcolate da eventuali sistemi di controllo aggiuntivi (ad esempio la correzione di coppia del sistema di anti impennamento). Sfruttando un apposito file di configurazione contenente i riferimenti al modello della motocicletta e al profilo di velocità, il core di VI-BikeRealTime simula in tempo reale il comportamento del veicolo sul tracciato prescelto elaborando ad ogni istante i valori dei segnali telemetrici. Questi ultimi sono prelevabili attraverso il blocco di output che, grazie ad un'apposita interfaccia, permette di selezionare i dati di interesse. La realizzazione della cosimulazione ha richiesto dapprima la modifica del blocco di input, introducendo la coppia erogata dal motore elettrico che viene sommata all'uscita del sottosistema rappresentate il motore endotermico (Figura 4.4).

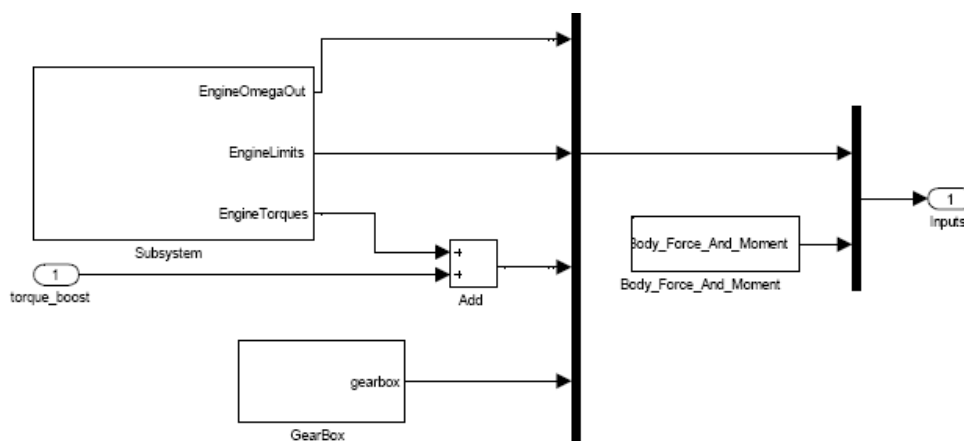


Figura 4.4: Introduzione del boost di coppia agli input del tool VI-BikeRealTime.

Sfruttando il blocco di output, sono stati prelevati i segnali necessari al funzionamento dei restanti blocchi della cosimulazione (rpm, velocità e marcia inserita) e altri segnali utili per effettuare analisi in post processing (coppia al motore, coppia al pignone, posizione sul tracciato, angolo di rollio, percentuale di acceleratore e di freno). Per semplicità, il blocco di output è quindi stato modificato in modo da salvare in apposite strutture dati i segnali prelevati, fornendo in output solo quelli necessari al funzionamento del restante sistema e i valori di coppia motore e coppia al pignone, utili per effettuare delle verifiche in tempo reale.

Analizzando i risultati preliminari, è emerso che l'introduzione della coppia aggiuntiva all'uscita al sottosistema rappresentante il motore endotermico provoca degli scompensi nel calcolo della percentuale di accelera-

tore e conseguentemente un notevole errore tra la velocità di riferimento e quella effettiva. Ad ogni passo di campionamento il driver virtuale calcola infatti la coppia necessaria a raggiungere la velocità target al passo successivo (feed forward), correggendo le eventuali deviazioni della velocità reale dal profilo di riferimento mediante un controllore PID (feedback). Sfruttando la caratterizzazione del motore a pieno acceleratore (Figura 2.2) e in fase di freno motore, il valore ottenuto viene successivamente convertito nella corrispondente percentuale di acceleratore, calcolata rispetto alla coppia massima e minima che il propulsore è in grado di erogare al regime di giri attuale con il metodo dell'interpolazione lineare. L'introduzione del boost, non essendo compensato da una riduzione dell'apertura della farfalla, provoca quindi un eccessivo incremento della velocità che l'anello di feedback non è in grado di gestire. Ciò è dovuto al fatto che il controllore PID è stato progettato per sopperire alle piccole variazioni dovute al rumore, che risultano molto inferiori rispetto a quelle causate dalla coppia erogata dal motore elettrico che può assumere valori pari a circa la metà di quella fornita dal motore endotermico.

Per ovviare a questo problema, con l'aiuto dei collaboratori di Vi-grade, il core del tool VI-BikeRealTime è stato modificato in modo che la coppia fornita dal motore elettrico venga aggiunta alla caratteristica del motore endotermico, ottenendo quindi un calcolo corretto della percentuale di acceleratore necessaria a raggiungere la velocità target. In questa maniera la mappa di coppia utilizzata dal driver virtuale in fase di boost risulta essere equivalente a quella studiata per il prototipo (Figura 2.8) ottenendo quindi una corretta simulazione. La modifica del core ha comportato l'ulteriore aggiornamento del blocco di input ed in particolare del sottosistema del motore endotermico, nel quale vengono utilizzati degli appositi input per sommare ai valori di coppia massima (a pieno acceleratore), minima (freno motore) ed erogata il boost fornito dalla macchina elettrica (Figura 4.5).

Attivazione della macchina elettrica

Il blocco *boost/charge activation* ha il compito di generare i segnali di attivazione del boost (*boostEnabled*) e della ricarica (*chargeEnabled*), necessari al corretto funzionamento della macchina elettrica e conseguentemente dell'intero sistema (Figura 4.6). Analogamente a quanto avviene nella simulazione statica (sezioni 2.2.2 e 2.2.3), questa operazione viene effettuata imponendo una soglia ($dSpeedZero > 0$) sulla derivata della velocità ($dSpeed$) in modo da individuare le fasi di accelerazione ($dSpeed > dSpeedZero$), di decelerazione e di moto a velocità costante ($dSpeed \leq dSpeedZero$). Inoltre, valutando la derivata del segnale indicante la mar-

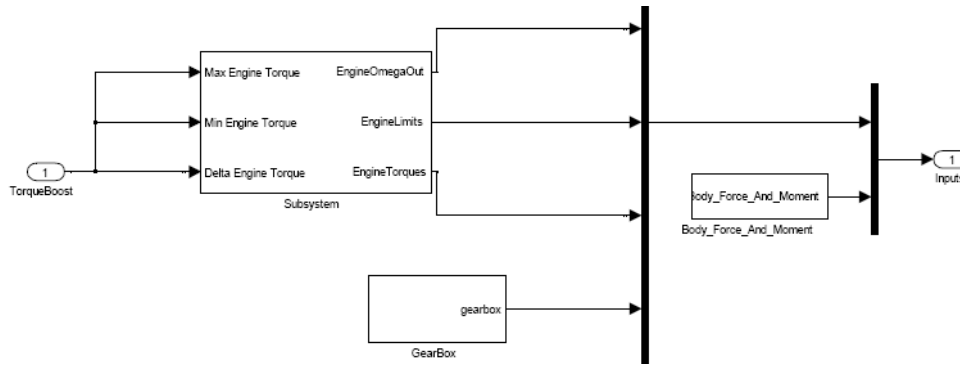


Figura 4.5: Introduzione del boost di coppia agli input del tool VI-BikeRealTime dopo l'aggiornamento.

cia inserita (*gearShift*), è possibile gestire la cambiata in maniera diretta, al contrario di quanto effettuato nella simulazione statica.

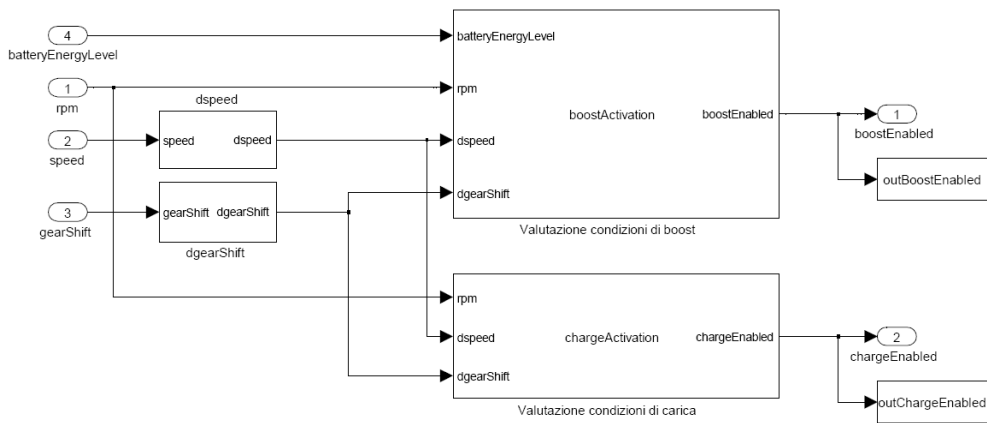


Figura 4.6: Blocco di attivazione del boost e della ricarica.

Nel caso la batteria disponga di energia ($batteryEnergyLevel(t-1) > MinEnergy$), il boost di coppia dovrà essere abilitato nelle fasi di accelerazione ai regimi di giri compresi nell'intervallo di intervento stabilito ($rpmBoostMin < rpm(t) < rpmBoostMax$), disabilitandolo il fase di cambiata (4.1).

$$\begin{aligned}
 boostEnabled = & \quad dSpeed(t) > dSpeedZero && \wedge \\
 & \quad dGearShift(t) \leq dGearShiftZero && \wedge \\
 & \quad rpmBoostMin < rpm(t) < rpmBoostMax && \wedge \\
 & \quad batteryEnergyLevel(t-1) > MinEnergy. && (4.1)
 \end{aligned}$$

Al contrario, la ricarica della batteria, nel caso non sia pienamente carica ($batteryEnergyLevel(t - 1) < MaxEnergy$), dovrà essere attivata nelle fasi di decelerazione e di moto a velocità costate ai regimi di giri superiori al limite minimo necessario alla generazione della corrente di carica ($rpm(t) \geq rpmChargeMin$). Inoltre è necessario gestire le cambiate in fase di accelerazione, in quanto il calo della derivata della velocità (di piccola durata) da esse provocato comporterebbe l'attivazione della ricarica per un piccolo intervallo di tempo, creando potenziali scompensi alla macchina elettrica e all'azionamento (4.2).

$$\begin{aligned}
 chargeEnabled = \quad & dSpeed(t) \leq dSpeedZero && \wedge \\
 & rpm(t) \geq rpmChargeMin && \wedge \\
 & dGearShift(t) \leq dGearShiftZero && \wedge \\
 & batteryEnergyLevel(t - 1) < MaxEnergy. && (4.2)
 \end{aligned}$$

Per garantire una maggiore flessibilità, la (4.1) e la (4.2) vengono implementate da due blocchi distinti (*boostActivation* e *chargeActivation*) facilitando inoltre il debug e l'inserimento di ulteriori controlli.

Macchina elettrica

Il blocco *electric motor* (di colore arancione in figura 4.3), simula il comportamento della macchina elettrica in fase di boost (*booster*) e in fase di ricarica (*charger*) separatamente, generando la coppia aggiuntiva, la relativa potenza assorbita e la potenza ricaricata (Figura 4.7).

Il funzionamento della macchina elettrica come motore viene simulato restituendo, nel caso il boost sia abilitato, il valore di coppia previsto dalla mappa di boost per il regime di giri attuale e la potenza istantanea assorbita (2.6). Il modello opera quindi ipotizzando istantanea l'azione del motore elettrico in quanto la sua dinamica, essendo molto più rapida rispetto a quella del motore endotermico, può essere trascurata ai fini della simulazione.

Mantenendo l'ipotesi di idealità, il funzionamento della macchina elettrica come generatore viene simulato sfruttando il modello della batteria ed il controllo di carica presentati nel capitolo precedente. Dovendo operare in tempo reale, in questo caso è necessario effettuare una stima della potenza di carica istantanea in funzione di quella precedentemente erogata, effettuando quindi la corretta regolazione della corrente di carica in funzione dello stato di carica della batteria come spiegato in sezione 3.3. Essendo priva di approssimazioni e pertanto coincidente con quella

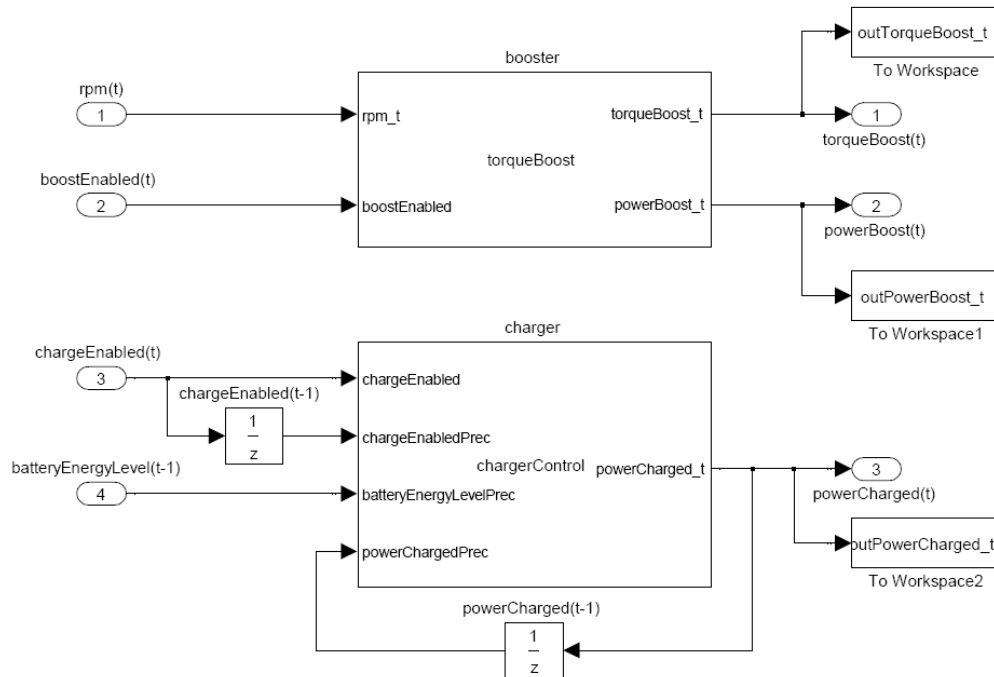


Figura 4.7: Blocco rappresentante la macchina elettrica.

effettivamente erogata, la potenza di carica stimata può essere utilizzata dallo stimatore al passo successivo, limitando ulteriormente i tempi di elaborazione. In questo modo è infatti possibile limitare l'utilizzo dei valori di tensione e corrente solamente al primo istante di carica, eliminando quindi il tempo di calcolo derivante dall'esecuzione della (3.8) e della (3.9). Il seguente algoritmo (Algoritmo 2) riporta quanto fin qui detto, con $\text{batteryEnergyLevelPrec}$ livello energetico della batteria al passo precedente, chargeEnabledPrec valore del segnale di abilitazione al passo precedente e powerChargedPrec potenza di carica al passo precedente.

Batteria

Il blocco *battery* (di colore giallo in figura 4.3) simula il comportamento della batteria, effettuando l'integrazione trapezoidale in avanti delle potenze assorbite ($\text{powerBoost}(t)$) e ricaricate ($\text{powerCharged}(t)$) dalla macchina elettrica rispettivamente in fase di boost e di ricarica.

Algoritmo 2 Simulazione generatore (*chargeControl*)

```

if chargeEnabled then
  /* Primo istante di carica */
  if  $\neg$ chargeEnabledPrec then
     $v \leftarrow V_{Batt}(batteryEnergyLevelPrec/maxEnergy)$ 
     $i \leftarrow I_{Batt}(batteryEnergyLevelPrec/maxEnergy)$ 
     $powerCharged\_t \leftarrow v \cdot i$ 
  else
     $t \leftarrow tP(powerChargedPrec)$ 
     $powerCharged\_t = Pt(t + T_c)$ 
  end if
else
   $powerCharged\_t = 0$ 
end if

```

4.3.2 Considerazioni

La cosimulazione appena descritta, sebbene priva di specifiche strategie di gestione della batteria e della macchina elettrica, ha permesso tuttavia di effettuare delle importanti considerazioni sull'utilizzo dell'ambiente di virtual prototyping e delle analisi preliminari sulle ripercussioni del motore elettrico sulla guida della motocicletta. In particolare è emerso come il confronto prestazionale tra il motociclo ibrido e quello originale debba essere effettuato sulle richieste del pilota. Come precedentemente spiegato il tool opera infatti sfruttando uno *specifico profilo di velocità* calcolato per il veicolo in esame, che rimane pertanto *inalterato nella simulazione* di entrambi i motoveicoli. Osservando il comportamento del driver emerge come a parità di velocità, la percentuale di acceleratore richiesta sia notevolmente inferiore, in particolare ai bassi regimi di giri dove la coppia erogata è superiore, evidenziando quindi la possibilità di ridurre l'utilizzo del motore endotermico e conseguentemente le emissioni. Analizzando lo stato di carica della batteria è stato inoltre possibile verificare ulteriormente il dimensionamento del pacco batterie, confermando le considerazioni precedentemente effettuate (Figura 4.8).

L'attuale configurazione, non gestendo la *parzializzazione* del motore elettrico, evidenzia delle problematiche nei frangenti di guida interessati da questa operazione in quanto la coppia fornita dal motore elettrico, coincidente con quella erogata alla massima apertura dell'acceleratore, potrebbe essere superiore a quella necessaria, provocando errori di traiettoria e in

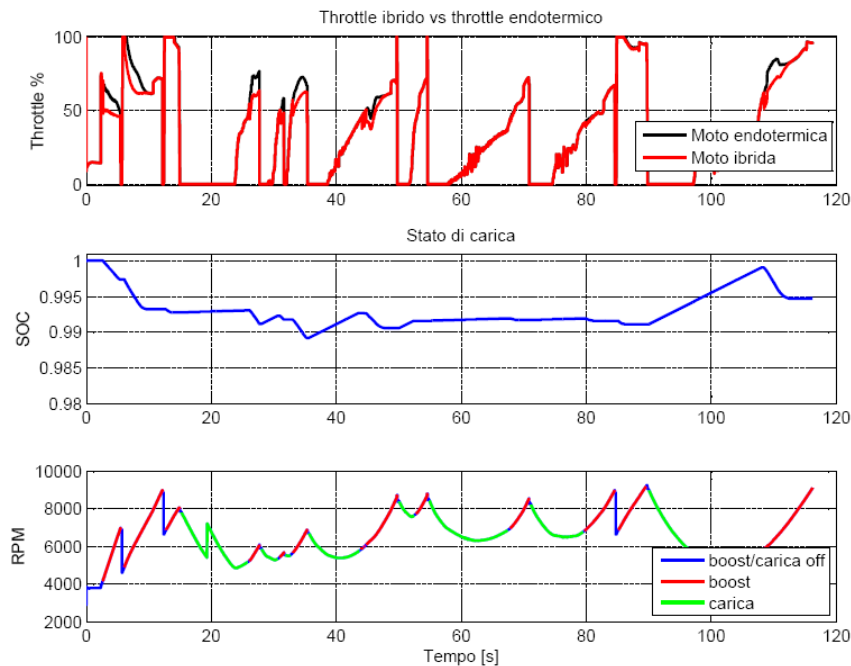


Figura 4.8: Risultati preliminari.

alcune circostanze la caduta della motocicletta. Inoltre, osservando la modalità di introduzione del boost di coppia, emerge come venga modificata anche la curva di coppia rappresentante il freno motore che in talune circostanze, diventando positiva, deve essere compensata mediante il sistema frenante. Queste problematiche vengono accentuate dallo stile di guida del pilota virtuale che, essendo pensato per la guida in pista, risulta essere molto aggressivo, e pertanto utile per verificare le criticità derivanti dall'erogazione della coppia elettrica in particolare per quanto riguarda la stabilità del motociclo. È inoltre emerso che, in fase di accelerazione, durante le cambiate i segnali di abilitazione effettuano delle rapide oscillazioni, che non possono essere eliminate con la condizione precedentemente esposta: ciò è dovuto al fatto che il segnale indicante la marcia, al momento della cambiata, effettua un gradino, portando alla disabilitazione dei segnali in un solo istante di campionamento, non consentendo di catturare l'intervallo temporale tra l'azionamento della frizione e la ripresa dell'accelerazione.

Ulteriori analisi sono state effettuate variando la *mappatura dei cambi marcia* utilizzati dal pilota virtuale, e conseguentemente lo stile di guida, in modo da simulare un utilizzo generico della motocicletta, dal quale è

emerso come la gestione della batteria, oltre a dipendere dal tragitto seguito, dipenda notevolmente dal pilota. In particolare è emerso come in talune condizioni di utilizzo la ricarica della batteria non possa essere effettuata a causa della violazione del vincolo sul limite minimo di giri. Ciò risulta particolarmente evidente nelle fasi a basse velocità, nelle quali l'utilizzo di un rapporto del cambio superiore provoca una sensibile riduzione del regime di rotazione del motore endotermico.

Da queste osservazioni si è proceduto all'aggiornamento del modello realizzato, introducendo strategie per la gestione delle problematiche emerse. In aggiunta è stata realizzata un'apposita implementazione del motore ibrido che evidenzia l'accoppiamento della macchina elettrica e del motore a combustione interna. Dopo l'aggiornamento, il modello (Figura 4.9) è quindi costituito dal tool VI-BikeRealTime e dai sottosistemi che simulano la batteria (*battery*), l'interfaccia di visualizzazione dei dati in tempo reale (*dashboard*) ed il motore ibrido con i relativi sistemi di controllo (*hybrid engine*). Si illustrano ora gli ultimi due sottosistemi implementati.

4.4 Motore ibrido

Parte fondamentale della nuova cosimulazione, il sottosistema *hybrid engine* (Figura 4.10) simula il comportamento del motore risultante dall'elettificazione del motociclo, generando le coppie massima e minima disponibili al regime di giri attuale e la coppia erogata, richieste dal tool VI-BikeRealTime, (*Max Engine Torque*, *Min Engine Torque*, *Engine Torque*), le potenze richieste e fornite alla batteria ed alcuni segnali necessari al funzionamento dell'interfaccia grafica. Il modello in esame è costituito da quattro elementi principali che simulano il motore endotermico (*endothermic engine*), il motore elettrico e il relativo sistema di controllo (*electric engine* e *charge/discharge activation*) e un particolare sistema di gestione dei motori (*adaptive optimizer*), presentato nel prossimo capitolo, basato sull'ottimizzazione di una specifica funzione di costo. Sfruttando questi elementi è quindi possibile risolvere le problematiche precedentemente esposte che coinvolgono due ambiti principali: l'accoppiamento dei motori e la gestione della batteria.

4.4.1 Accoppiamento dei motori

L'aspetto principale riguardante l'unione dei due propulsori, importante per migliorare le sensazioni di guida e fondamentale per ovviare agli

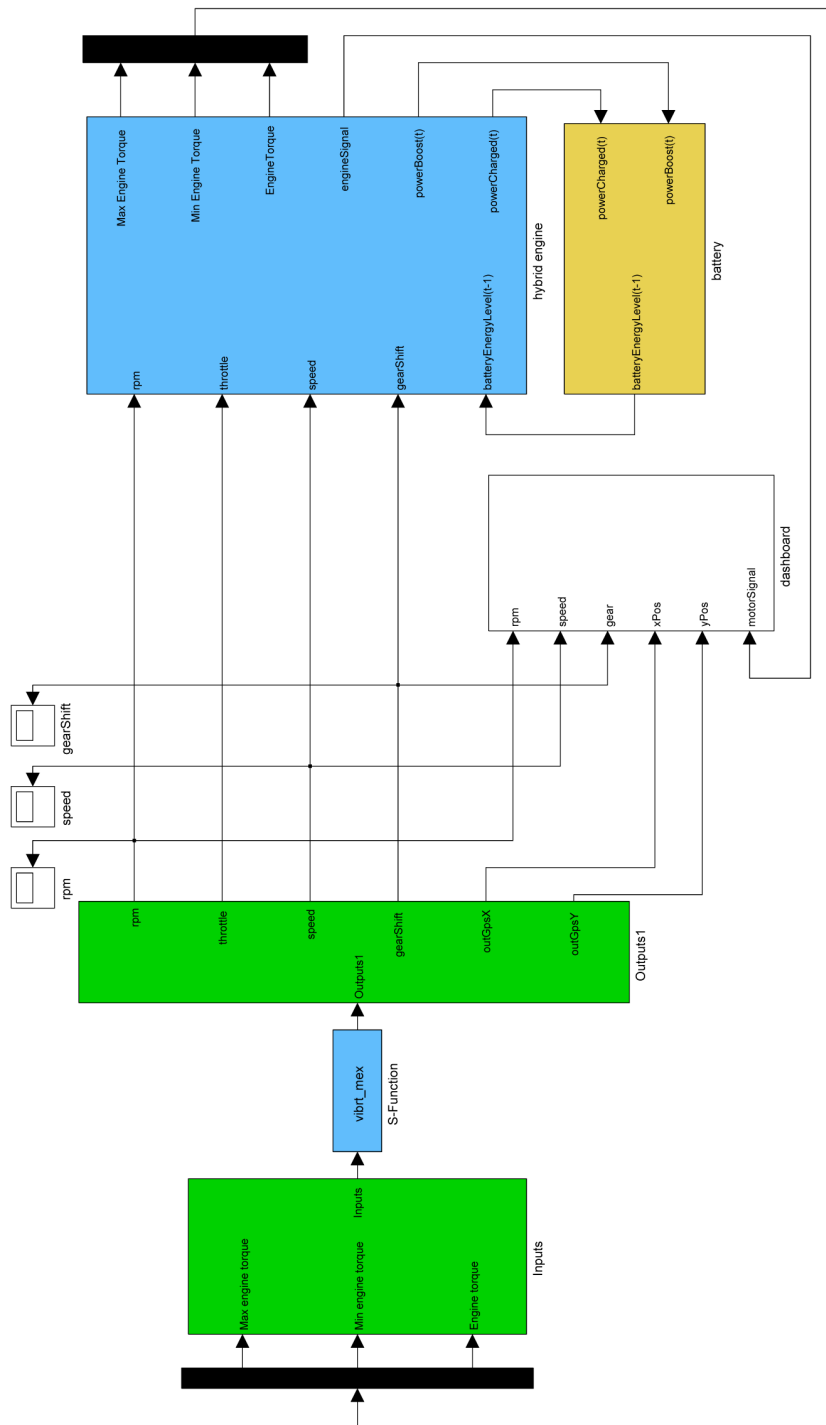


Figura 4.9: Modello Simulink della cosimulazione completa.

scompensi emersi dalle analisi preliminari, è la corretta gestione della *parzializzazione dell'acceleratore (throttle)*. Questo aspetto è stato affrontato introducendo il modello del motore endotermico e modificando il blocco rappresentante il funzionamento della macchina elettrica con l'introduzione del segnale di throttle. Il blocco *endothermic engine*, sfruttando le caratteristiche coppia-rpm alla massima e minima apertura di acceleratore, genera i tre valori di coppia richiesti dal tool VI-BikeRealTime. In particolare, la coppia erogata dal motore endotermico viene calcolata effettuando un'interpolazione lineare delle curve di riferimento in funzione del valore di throttle e degli rpm correnti, ottenendo valori analoghi a quelli generati dal tool. Il vantaggio della gestione diretta del motore endotermico è tuttavia la possibilità di variare la gestione della parzializzazione che, disponendo delle mappature specifiche, può essere ulteriormente affinata. Il medesimo procedimento viene seguito anche nel caso del motore elettrico per il quale, non generando freno motore, è sufficiente scalare la coppia ottenuta dalla mappa di boost per il valore del segnale di throttle. Affinchè il calcolo della massima coppia erogabile dal motore ibrido avvenga correttamente, il sottosistema del motore elettrico è stato aggiornato in modo da fornire il massimo valore di boost erogabile ad ogni regime di giri ($fullBoost(t)$). I valori di coppia del motore ibrido sono quindi ottenuti sommando rispettivamente, le coppie massime, minime ed erogate dai due sottosistemi (sommatori in figura 4.10). Per quanto riguarda la gestione della cambiata, per eliminare le oscillazioni dei segnali, è stato introdotto un sistema di *temporizzazione* nei blocchi di attivazione della carica e della scarica, che permette di disabilitare i segnali in tutta la durata dell'operazione. Osservando la durata delle cambiate è stato quindi possibile introdurre un temporizzatore che, avviato al momento del cambio marcia, riabilita il calcolo dei segnali al proprio scadere.

4.4.2 Gestione della batteria

Per quanto riguarda la gestione delle criticità riguardanti lo stato di carica della batteria, come precedentemente accennato, esse dipendono fortemente dal tipo di percorso e dallo stile di guida del pilota. Ad esempio, alcuni percorsi caratterizzati dal susseguirsi di lunghe accelerazioni a partire da velocità e da violente frenate possono provocare il rapido decadimento dello stato di carica della batteria, in quanto la breve durata del periodo di ricarica non sopperisce al quantitativo di energia spesa durante il boost. Altro aspetto da considerare è quello riguardante lo stile di guida, precedentemente presentato, che influenzando il regime di giri può impedire la ricarica a causa della violazione del regime minimo. Trattandosi di un vei-

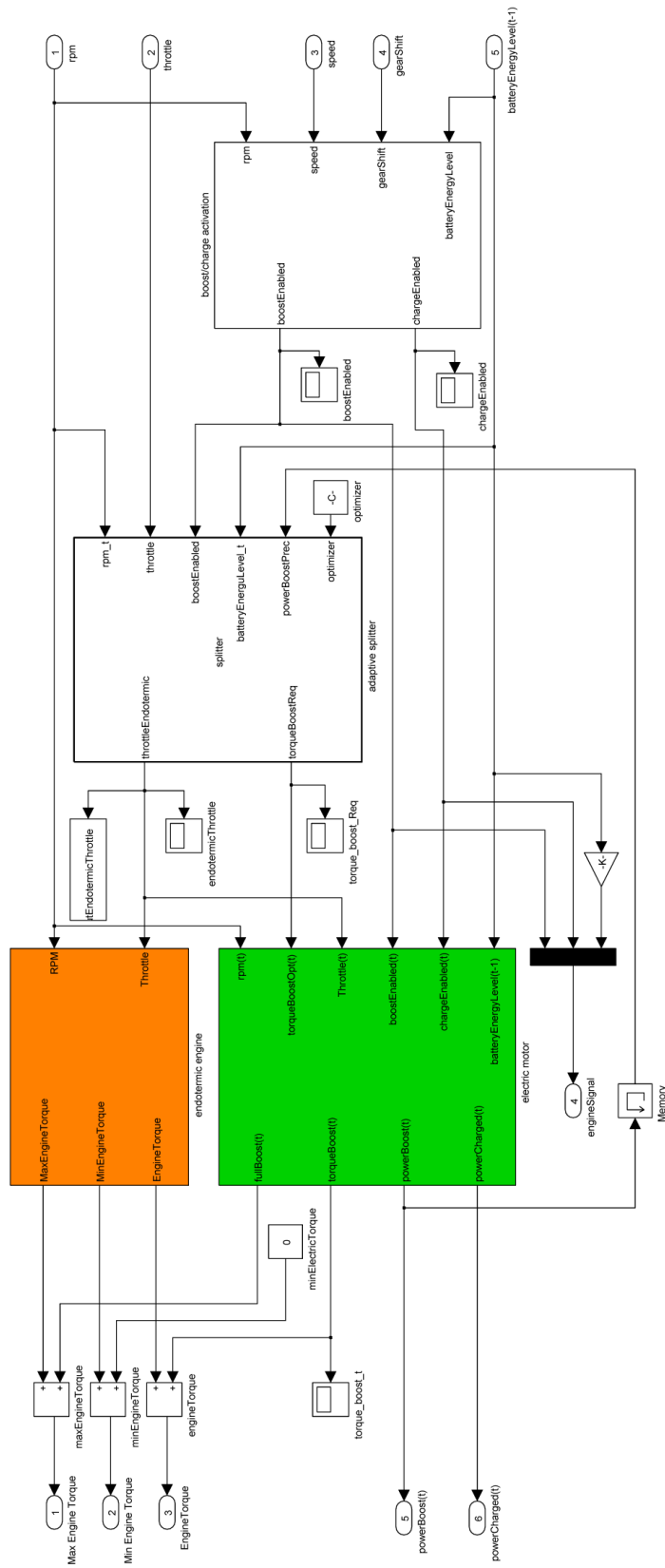


Figura 4.10: Sottosistema rappresentante il motore ibrido.

colo stradale si devono inoltre considerare tutte quelle circostanze, come la guida cittadina, in cui il regime rimane mediamente basso, favorendo l'erogazione del boost ma impedendo al contempo la ricarica. Per questo motivo sono state realizzate due strategie di gestione della batteria orientate alla gestione della scarica della batteria, in modo da evitare repentini cali prestazionali dovuti al non funzionamento della macchina elettrica a causa della mancanza di energia, e alla gestione della modalità di ricarica, in modo da adattarla al tipo di guida e al percorso.

Gestione della scarica

La strategia realizzata per la gestione della scarica interviene sull'erogazione del boost di coppia, limitando la mappatura di riferimento in funzione dello stato di carica della batteria. Il fattore di riduzione (*scalingFactor*) della mappatura viene calcolato utilizzando due coppie di valori di soglia, una superiore e una inferiore ((th_u, th_b)), che variano a seconda delle condizioni del sistema all'avvio del boost. Sfruttando il fattore di riduzione e lo stato di carica, è infatti possibile stabilire il trend dello stato di carica selezionando opportunamente i valori di soglia da applicare a seconda che esso sia crescente ((th_u^{inc}, th_b^{inc})) o decrescente ((th_u^{dec}, th_b^{dec})). La distinzione di questi casi permette infatti di impostare un'isteresi sull'andamento del fattore di riduzione, evitando delle repentine oscillazioni delle prestazioni. In questo modo è possibile impostare tre fasce prestazionali al variare dello SOC e delle soglie:

- una fascia di massima potenza della macchina elettrica nel caso in cui lo stato di carica sia maggiore della soglia superiore impostata;
- una fascia in cui le prestazioni del boost vengono scalate in funzione dello stato di carica nel caso in cui esso sia compreso tra le due soglie;
- una fascia in cui la macchina elettrica viene disabilitata nel caso in cui lo stato di carica sia minore della soglia inferiore impostata.

Questo sistema, attivabile mediante un apposito parametro, viene realizzato dal blocco di attivazione del boost (Algoritmo 3), sfruttando il segnale generato per indicare contemporaneamente l'abilitazione e il fattore di riduzione da applicare. Tale modifica ha richiesto l'aggiornamento del blocco rappresentante il motore elettrico, nel quale la mappa del boost viene riscalata per il valore del segnale di attivazione.

Algoritmo 3 Gestione della scarica

```

/* impostazione valori iniziali */
if  $\nexists$  scalingFactor then
    scalingFactor  $\leftarrow$  1
end if
if boostcondition (4.1) then
    if dischargeControl then
        /* calcolo dello scaling factor */
        if  $SOC < th_u^{dec} \wedge scalingFactor = 1$  then
            scalingFactor  $\leftarrow$  SOC
        end if
        if  $SOC < th_b^{dec} \wedge scalingFactor < 1$  then
            scalingFactor  $\leftarrow$  0
        end if
        if  $SOC > th_b^{inc} \wedge scalingFactor = 1$  then
            scalingFactor  $\leftarrow$  SOC
        end if
        if  $SOC > th_u^{inc} \wedge scalingFactor < 1$  then
            scalingFactor  $\leftarrow$  1
        end if
        boostEnabled  $\leftarrow$  scalingFactor
    else
        boostEnabled  $\leftarrow$  1
    end if
else
        boostEnabled  $\leftarrow$  0
    end if

```

Gestione della modalit  di ricarica

Per quanto riguarda la gestione della modalit  di ricarica (kC), sfruttando la relazione che lega il limite minimo di giri alla corrente di ricarica, il sistema realizzato seleziona la strategia di ricarica (tra quella a 1C e 2C) che meglio si adatta allo stile di guida e al percorso. Analizzando l'andamento degli rpm in un intervallo di osservazione di durata stabilita, viene calcolato il tempo trascorso ad un regime di giri superiore alla soglia di giri minima per la ricarica a 2C ($timer_{2C}$) e quello trascorso ad un regime di giri compreso tra le soglie minime previste per le modalit  di ricarica a 1C e 2C ($timer_{1C}$). Al termine di ciascun intervallo di osservazione, qualora la loro differenza risulti superiore ad una soglia di tolleranza

($|(\text{timer}_{2C} - \text{timer}_{1C})| > \varepsilon$), i valori temporali vengono confrontati, selezionando la modalità di ricarica (inizialmente impostata a 2C) corrispondente al valore temporale maggiore. Come nel caso della gestione della scarica, la soglia di tolleranza permette di introdurre un'isteresi sulla differenza dei due valori temporali, eliminando il susseguirsi di cambi di modalità di ricarica che si verificherebbero qualora la loro differenza fosse minima.

Algoritmo 4 Gestione della modalità di ricarica

```

/* impostazione valori iniziali */
if  $\nexists k$  then
   $k \leftarrow 2$ 
   $\text{timer} = 0$ 
   $\text{timer}_{1C} = 0$ 
   $\text{timer}_{2C} = 0$ 
end if
/* selezione della modalità di ricarica  $k$  */
if chargecondition (4.2) then
  if modeSwitching then
     $\text{timer} \leftarrow \text{timer} + 1$ 
    if  $rpmMin_{1C} < rpm < rppmMin_{2C}$  then
       $\text{timer}_{1C} \leftarrow \text{timer}_{1C} + 1$ 
    else
      if  $rpm > rppmMin_{2C}$  then
         $\text{timer}_{2C} \leftarrow \text{timer}_{2C} + 1$ 
      end if
    end if
  end if
  if  $\text{timer} = \text{observationTime}$  then
    if  $(\text{timer}_{1C} > \text{timer}_{2C} \wedge |(\text{timer}_{1C} - \text{timer}_{2C})| > \varepsilon)$  then
       $k \leftarrow 1$ 
    else
       $k \leftarrow 2$ 
    end if
  end if
   $\text{chargeEnabled} \leftarrow k$ 
else
   $\text{chargeEnabled} \leftarrow k_{man}$ 
end if
else
   $\text{chargeEnabled} \leftarrow 0$ 
end if

```

Questo sistema viene realizzato dal blocco di attivazione della ricarica, sfruttando il segnale generato per indicare contemporaneamente l'abilitazione e il fattore di riduzione da applicare. Inoltre, per permettere di confrontare le prestazioni ottenute dalle due modalità di ricarica nelle medesime condizioni, è stata introdotta la possibilità di disabilitare la funzionalità di selezione automatica e di impostare la strategia di ricarica manualmente mediante un apposito parametro (k_{man}), come evidenziato dall'algoritmo 4. La modifica dei valori assunti dal segnale di abilitazione ha conseguentemente richiesto l'aggiornamento del blocco rappresentante la macchina elettrica nel funzionamento da generatore, in modo da selezionare correttamente i parametri del modello della batteria al variare della modalità di ricarica.

4.5 Interfaccia grafica

Per completare l'ambiente di virtual prototyping e facilitare il settaggio dei principali parametri della simulazione e consentire la visualizzazione delle informazioni principali sullo stato della moto in tempo reale sono state realizzate due distinte interfacce grafiche descritte nel proseguo.

4.5.1 Settaggio della simulazione

Analizzando la cosimulazione completa di tutte le funzionalità emerge come, per raggiungere la massima flessibilità, necessiti di numerosissimi parametri, che devono essere caricati sul workspace prima di avviare la simulazione. Sebbene la maggior parte di essi dipendano fortemente da specifiche componenti della motocicletta, come ad esempio quelli del modello della batteria, è stato individuato un sottoinsieme di parametri (definiti sia nel modello che nel workspace) che permettono di variare le caratteristiche della simulazione. I principali parametri di interesse individuati sono il profilo di velocità ed il relativo circuito, il numero di celle, la strategia di ricarica ed i flag di abilitazione delle varie funzionalità. Inoltre, nell'eventualità che vi siano differenti mappature del boost, è stato introdotto un parametro di selezione. L'interfaccia grafica realizzata (Figura 4.11) permette quindi di variare i valori delle principali variabili di interesse, mettendo a disposizione dei pulsanti per avviare la simulazione, senza ricorrere all'ambiente Simulink rendendo più agevoli le operazioni. Sfruttando l'interfaccia è possibile effettuare le seguenti operazioni:

- caricare, mediante una comoda finestra di selezione, il *profilo di velocità ed il relativo circuito*, sui quali si vuole simulare il comportamento della moto ibrida (pulsanti *Load profile* e *Load track*);
- abilitare le principali funzionalità riguardanti la *gestione della scarica* (*Battery level booster check*), abilitare la gestione dei propulsori basata sull'*ottimizzazione* presentata nel prossimo capitolo (*Optimizer*) e variare le *mappature del boost*, il tutto in tempo reale permettendo di simulare le possibili operazioni effettuate dal pilota sui controlli disponibili:
- abilitare la *gestione della ricarica* (*Auto*) o impostare la modalità di ricarica manualmente (*Manual*) e selezionare il numero di celle. In questo caso, gli interventi sui parametri vengono permessi solo prima dell'avvio della simulazione, in quanto i parametri impostati non sono in generale variabili in tempo reale, pur essendo interessanti dal punto di vista della generazione e del confronto di dati telemetrici generati in differenti condizioni, come ad esempio con un numero di celle differente in fase di dimensionamento.

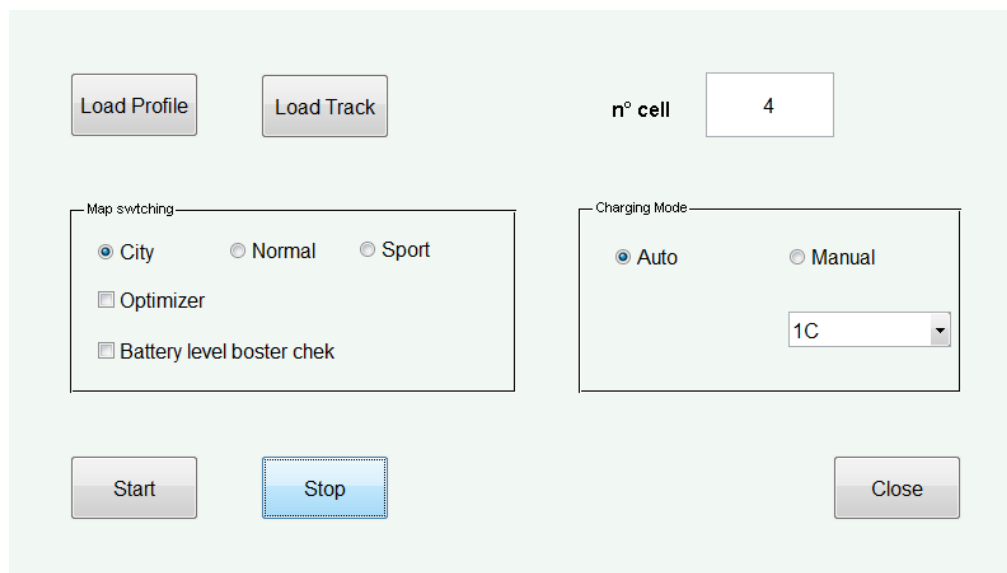


Figura 4.11: Interfaccia di impostazione della simulazione.

4.5.2 Cruscotto

Per quanto riguarda la visualizzazione dello stato della moto in tempo reale (Figura 4.12), l'interfaccia grafica viene realizzata dal blocco *dashboard* della cosimulazione ed è costituita da due elementi principali: un cruscotto analogo a quello montato sulla motocicletta ed un display riportante la posizione della moto sul tracciato selezionato. Sfruttando un contagiri analogico, il primo elemento permette di visualizzare l'andamento istantaneo del numero di giri e, mediante il display elettronico, la velocità e la marcia inserita. In aggiunta, il display riporta lo stato di carica della batteria, la modalità di ricarica corrente (*1C* o *2C*), l'abilitazione della gestione della ricarica (*Auto*), la mappatura selezionata (*City*, *Normal*, *Sport*), le prestazioni del boost nel caso sia abilitata la gestione della scarica (*Full*, *Red* e *Off*) e l'eventuale abilitazione del sistema di ottimizzazione (*Opt*). Il display a lato, come precedentemente accennato, ha il compito di visualizzare la posizione della moto nel circuito evidenziando, mediante il cambiamento del colore dell'indicatore, l'attivazione del boost (rosso), della ricarica (verde) o di nessuno dei due (blu).

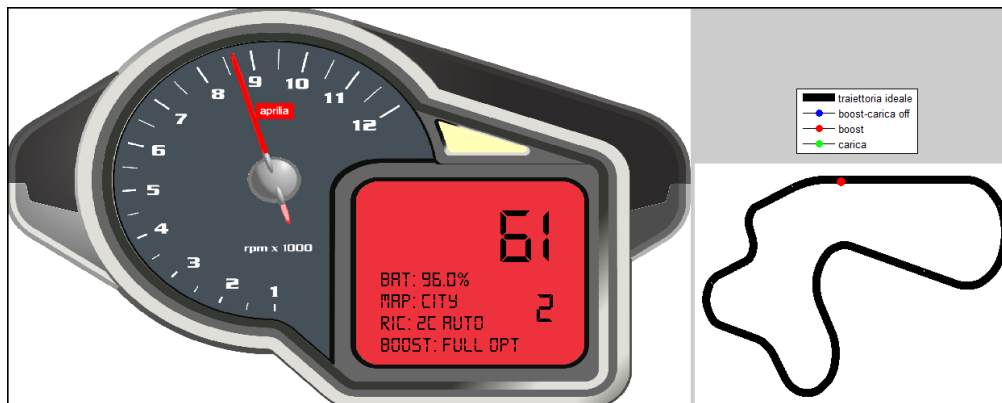


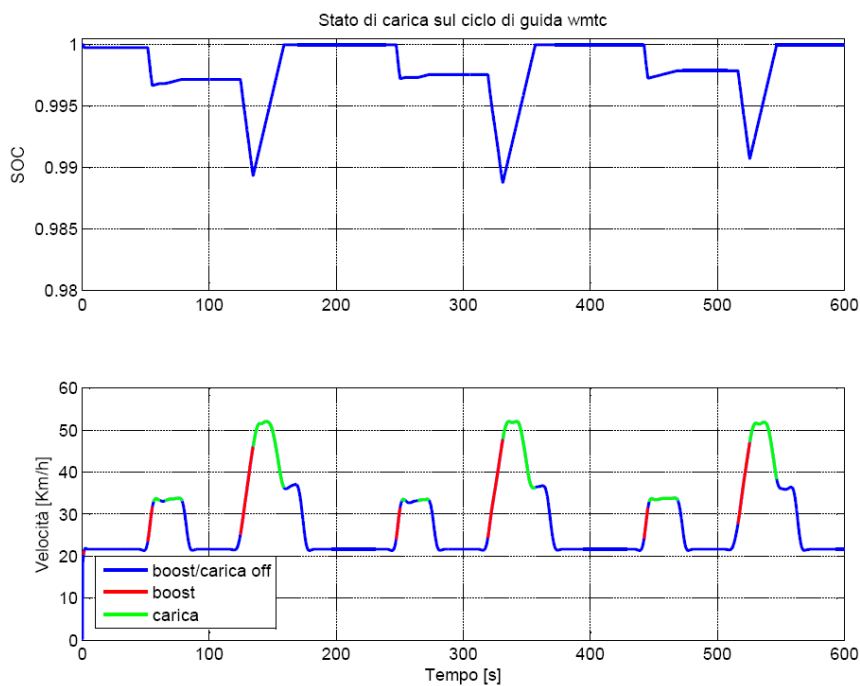
Figura 4.12: Interfaccia di visualizzazione dei dati in tempo reale.

Questa interfaccia risulta molto utile per eventuali simulazioni che prevedano che il pilota agisca sul manubrio abilitando e disabilitando le varie funzionalità e variando la mappa del boost, permettendo di decidere in tempo reale in quale punto del percorso effettuare tali operazioni.

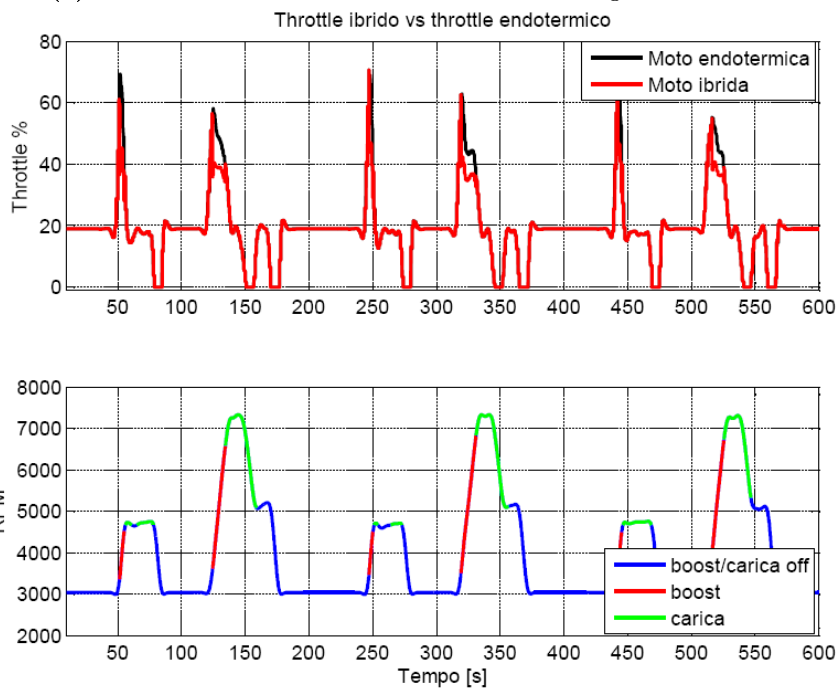
4.6 Risultati

Dopo aver descritto dettagliatamente la struttura dell'ambiente di virtual prototyping realizzato, in questa sezione verranno presentati i risultati ot-

tenuti simulando il comportamento del motociclo sul ciclo WMTC (nella parte cittadina) e su un ciclo di guida misto realizzato in circuito. Sfruttando i dati telemetrici della parte cittadina del ciclo di omologazione inizialmente disponibili, è stato realizzato un profilo di velocità della durata di circa dieci minuti sul quale è stato simulato il comportamento del prototipo (imponendo una strategia di ricarica a 2C e il mantenimento dello stesso rapporto del cambio) consentendo di effettuare un'ulteriore validazione del dimensionamento della batteria e di verificare le ripercussioni del motore ibrido sulle richieste del pilota (Figura 4.13). Osservando l'andamento dello stato di carica (Figura 4.13a) si nota come esso confermi le considerazioni effettuate mediante l'analisi statica, confermando la bontà del dimensionamento. Per quanto riguarda le ripercussioni sulla guida derivanti dalla presenza del motore elettrico, confrontando i segnali di throttle generati dalla motocicletta con il solo motore endotermico e da quella ibrida, si nota come in fase di boost si abbia una notevole riduzione dell'apertura dell'acceleratore, evidenziando quindi, a parità di velocità, il minor utilizzo del motore endotermico e la conseguente riduzione delle emissioni (Figura 4.13b). Per poter effettuare un'ulteriore validazione in condizioni più simili alla realtà, è stata effettuata un'ulteriore simulazione (con una strategia di ricarica a 2C) su un profilo di guida misto, contenente un range di velocità compatibili con percorsi di tipo urbano ed extraurbano (Figura 4.14), evidenziando come, anche in questo caso, lo stato di carica della batteria si mantenga prossimo al valore massimo (Figura 4.14a). Osservando i segnali di throttle si nota come, anche in questa circostanza, si verifichi una diminuzione della richiesta di acceleratore da parte del pilota, che aumenta all'aumentare del boost erogato (Figura 4.14b). Inoltre, analizzando l'andamento del numero di giri, si nota come la presenza del motore elettrico abbia i maggiori riscontri ai bassi regimi, confermando che nei percorsi di tipo urbano, in cui si hanno delle ripetute accelerazioni con un regime di giri medio basso, esso possa garantire una notevole riduzione dell'utilizzo del motore endotermico e conseguentemente dei consumi. In aggiunta, effettuando ripetute prove di simulazione in differenti condizioni, è emerso come le modifiche introdotte permettano di eliminare le criticità riguardanti la stabilità del veicolo in fase di erogazione del boost garantendo una buona gestione dei cambi marcia, come si può osservare dall'andamento della velocità in cui, in corrispondenza della cambiata, si riscontra la corretta disabilitazione del boost per tutta la durata dell'operazione (Figura 4.14a)

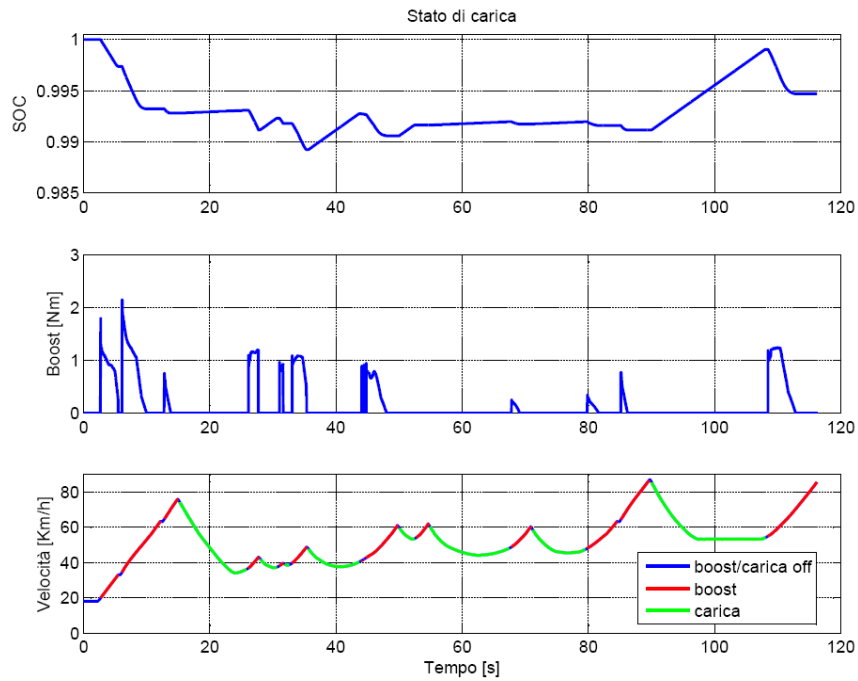


(a) SOC, coppia di boost e velocità sul ciclo di guida WMTC

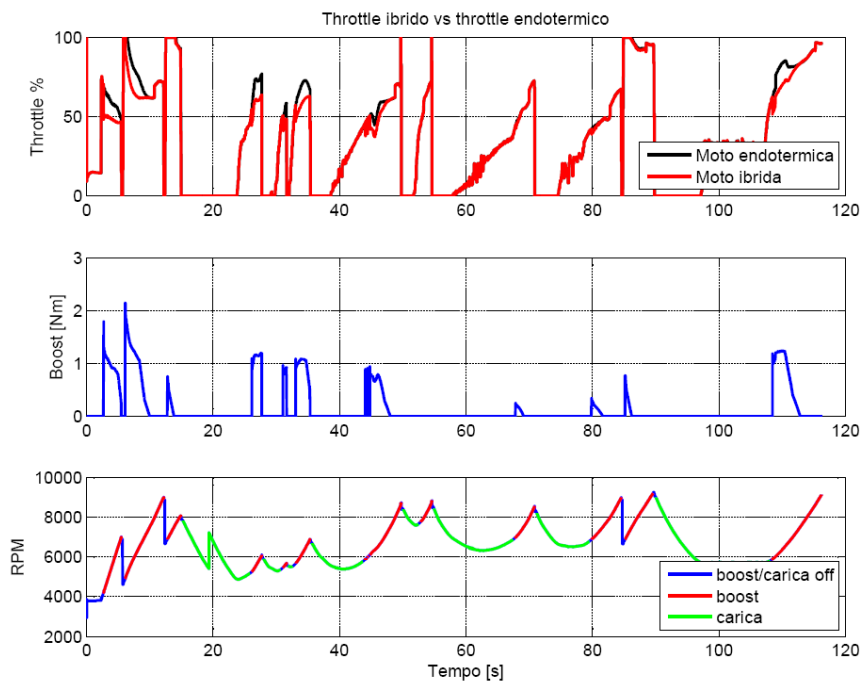


(b) Confronto tra i segnali di throttle della moto endotermica e del prototipo sul ciclo WMTC

Figura 4.13: Risultati della simulazione dinamica sul ciclo WMTC.



(a) SOC, coppia di boost e velocità su un ciclo di guida misto



(b) Confronto tra i segnali di throttle della moto endotermica e del prototipo su un ciclo di guida misto

Figura 4.14: Risultati della simulazione dinamica su un ciclo di guida misto.

Gestione ottima dell'energia

Uno dei principali temi di ricerca degli ultimi anni è la gestione efficiente dell'energia in tutti i settori, in particolar modo nel ambito dei veicoli ibridi. Questi ultimi, individuati come la soluzione cardine per la riduzione delle emissioni inquinanti nel settore dei trasporti, hanno visto un forte incremento delle potenzialità dal punto di vista della riduzione dei consumi di carburante, portando all'intensificarsi degli studi sullo sviluppo di sistemi efficienti della gestione dell'energia e dell'accoppiamento dei propulsori [21].

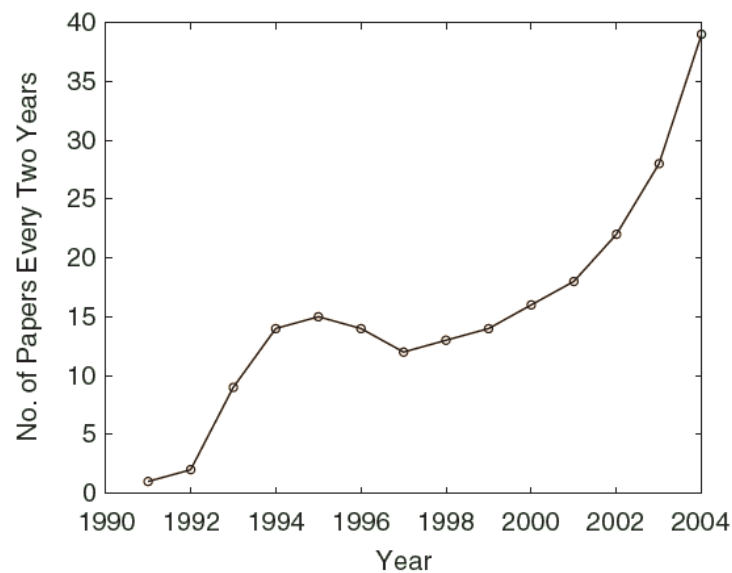


Figura 5.1: Trend della ricerca nel controllo dei veicoli ibridi.

Una notevole evoluzione si è quindi riscontrata anche in questi sistemi, le cui strategie sono state formalizzate con svariati approcci, inizialmente di tipo euristico, via via più raffinati (Figura 5.1). Il processo di evoluzione ha tuttavia evidenziato come queste tipologie di sistemi siano fortemente dipendenti dalla tipologia di percorso di guida, necessitando di tarature specifiche per ogni differente condizione di guida. La principale metodologia utilizzata per risolvere queste problematiche è quella dell'ottimizzazione basata sul modello che, sfruttando delle opportune modellazioni dei veicoli ibridi e delle funzioni di costo, permette di migliorare notevolmente le prestazioni dei sistemi di power management. L'obiettivo principale di questi sistemi è quello di minimizzare il consumo di carburante complessivo di ciascun percorso, potendo sfruttare un set limitato di informazioni riguardanti alcuni cicli di guida di riferimento. La maggior parte degli approcci basati su metodi di ottimizzazione di tipo statico, numerico (programmazione dinamica) e analitico richiede tuttavia la conoscenza a priori del ciclo di guida da effettuare (profilo di velocità, richieste del pilota, ecc) per calcolare i valori istantanei necessari al raggiungimento dell'obiettivo di ottimalità al termine del tragitto. Nell'utilizzo quotidiano dei veicoli ciò non è tuttavia ottenibile, rendendo necessario lo sviluppo di strategie di ottimizzazione real time che, analizzando il comportamento del veicolo, permettano di adattare questi approcci garantendo prestazioni subottime. La maggior parte di questi approcci è tuttavia stata sviluppata per il campo automobilistico nel quale i veicoli ibridi sono fortemente diffusi, disponendo inoltre di sofisticati sistemi meccanici di accoppiamento della macchina elettrica e del motore elettrico, come ad esempio le trasmissioni di tipo planetario, che permettono di ideare strategie di ottimizzazione nelle quali è possibile far operare le due entità di propulsione a differenti punti di lavoro. Per quanto riguarda il prototipo oggetto di questo studio, essendo il motore endotermico e la macchina elettrica fisicamente collegate mediante l'albero motore, ciò non è realizzabile incrementando ulteriormente la difficoltà del problema di gestione dell'energia. Dopo aver riportato una panoramica delle principali strategie di power management real time per i veicoli ibridi di tipo parallelo, verrà presentato un sistema di *torque split* realizzato per il prototipo in esame.

5.1 Strategie real time

La problematica è la determinazione dei flussi energetici ottimi che, in ogni istante, devono coinvolgere la macchina elettrica ed il motore endotermico in modo da raggiungere l'obiettivo stabilito. Le strategie presentate in

questa sezione sfruttando approcci di ottimizzazione diversi, permettono di calcolare i valori di potenza o di coppia (*power split* o *torque split*) che ciascun propulsore deve erogare al fine di minimizzare il consumo di carburante al termine del ciclo di guida. Non disponendo a priori delle informazioni riguardanti il percorso e le richieste del pilota, le strategie operanti in tempo reale possono quindi disporre dei soli dati derivanti dalla storia recente, dallo stato corrente del veicolo ed eventualmente da un set statico di valori e da essi, mediante opportune elaborazioni, ottenere i valori dei flussi energetici ottimi da applicare in ogni istante. In base alla tipologia di ottimizzazione, alle informazioni utilizzate e alla funzione di costo utilizzata, si possono distinguere diversi approcci nella realizzazione dei sistemi di power management in tempo reale, tra cui:

- *A-ECMS (Adaptive Equivalent Consumption Strategies)* o strategia del consumo equivalente di carburante adattiva [22] che estende la metodologia il framework generale ECMS introducendo un aggiornamento dei parametri dipendente dalle condizioni di guida. La metodologia generale, sfruttando una particolare funzione che permette di calcolare un fattore di equivalenza tra il carburante e l'energia elettrica, calcola ad ogni istante i valori di potenza che i due propulsori devono erogare per minimizzare la funzione di costo rappresentante il consumo equivalente di carburante rispettando i vincoli imposti dal modello del sistema (ECMS). Il deficit principale di questo approccio è la forte dipendenza del fattore di equivalenza dal particolare ciclo di guida, problematica superata dalla strategia A-ECMS mediante l'utilizzo di un particolare algoritmo che, sfruttando i dati derivanti da apposite strumentazioni (GPS), adatta periodicamente il valore di equivalenza in base al carico richiesto dal percorso, calcolato combinando la stima dei valori futuri e passati.
- *Controllo predittivo basato sul modello (Model Predictive Control)* che effettua un'ottimizzazione vincolata, che considera il modello del sistema e i vincoli imposti sul livello energetico della batteria, limitata ad un intervallo di predizione per il quale vengono stimate le grandezze di interesse. Sfruttando questa metodologia generale in [23] viene minimizzata una funzione di costo rappresentate il carburante consumato dal motore endotermico per erogare la coppia richiesta ad ogni istante dell'intervallo di predizione al corrispondente regime di giri, all'aumentare del quale si ha un incremento del flusso di combustibile. Sfruttando una particolare riformulazione del problema di ottimo, nell'approccio in esame viene effettuata la cosiddetta eliminazione dell'intervallo di predizione, riducendo quest'ultimo ad

un solo istante di campionamento, calcolabile direttamente mediante il modello del sistema. Un approccio simile viene utilizzato in [24] in cui, mediante una complessa funzione di costo che considera l'efficienza della batteria e della rete di azionamento, l'ottimizzazione viene estesa all'intera rete elettrica di potenza del veicolo. Una recente strategia, presentata in [25], utilizza l'MPC per calcolare i valori dei flussi energetici che permettono di minimizzare il consumo di carburante nell'intervallo di predizione, introducendo dei vincoli riguardanti l'efficienza del motore e l'uguaglianza (entro un intervallo di tolleranza) dello SOC all'inizio e alla fine dell'intervallo temporale. Differentemente dagli approcci, nel caso in esame la predizione dei valori di velocità necessari al calcolo della funzione di costo viene effettuata sfruttando differenti porzioni di telemetrie esistenti.

- *Controllo ottimo stocastico* che sfrutta la modellazione stocastica di una o più variabili di interesse per realizzare degli stimatori che, basandosi sulle misurazioni correnti, permettono di calcolarne i valori al passo successivo, sui quali applicare il controllo ottimo. Questo approccio viene utilizzato in [26] in cui viene effettuata una modellazione stocastica del ciclo di guida che permette di stimare le potenze da esso richieste, applicando una procedura di ottimizzazione per ottenere lo split di potenza che minimizza una funzione di costo basata sul costo equivalente del carburante consumato dal motore endotermico e dalla macchina elettrica.

5.2 Torque split adattivo

Analizzando l'architettura del prototipo da realizzare, emerge come le tecniche precedentemente esposte, pensate per ottenere il giusto trade off tra autonomia della batteria e risparmio di carburante, siano state realizzate su veicoli paralleli dotati di particolari dispositivi di trasmissione di cui il motociclo da elettrificare non è dotato. Nel caso in esame, essendo essi fisicamente vincolati dall'albero motore, i due propulsori devono necessariamente operare al medesimo regime di giri, impedendo quindi l'applicazione delle tecniche di ottimizzazione basate sul punto di lavoro del motore endotermico. Osservando la struttura del sistema di controllo realizzato, rappresentato dalla cosimulazione presentata nella sezione precedente, si nota come ad ogni istante sia disponibile la coppia richiesta dal pilota (τ_r), che può pertanto essere utilizzata per realizzare una strategia di torque split, in grado di calcolare i valori di coppia che devono essere

erogati dal motore a combustione interna (τ_{ice}) e dalla macchina elettrica (τ_{em}). Essendo orientato alla realizzazione dell'effetto boost con il vincolo che lo stato di carica finale si mantenga prossimo al massimo, il sistema realizzato è stato incentrato alla minimizzazione dell'utilizzo del motore endotermico in fase di accelerazione, garantendo al contempo l'autonomia della batteria richiesta. Dovendo operare in tempo reale, la strategia è stata implementata con un approccio di tipo *greedy*, sfruttando un'ottimizzazione puntuale basata sul modello per il calcolo dei valori di coppia che minimizzano il valore istantaneo della funzione di costo che, mediante un apposito algoritmo, viene adattata alle condizioni di guida.

5.2.1 Modellazione del sistema

Disponendo delle curve caratteristiche coppia-rpm del motore endotermico alla massima e minima apertura dell'acceleratore e della coppia massima e minima erogabili dal motore elettrico, è quindi possibile definire il modello del sistema in esame che descrive i vincoli fisici di interesse che devono essere considerate durante la procedura di ottimizzazione. I principali aspetti da considerare sono l'*ottenimento della coppia richiesta*, il rispetto dei *vincoli di coppia massima e minima* erogabili dal motore endotermico ($\tau_{em}^{max}(rpm(t))$ e $\tau_{ice}^{min}(rpm(t))$) e dal motore elettrico ($\tau_{em}^{max}(rpm(t))$ e $\tau_{em}^{min}(rpm(t))$) al regime di giri corrente e il *mantenimento dello stato di carica* entro i limiti stabiliti (SOC_{min} e SOC_{max}) (5.1),

$$\begin{cases} SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \\ \tau_r(t) = \tau_{ice}(t) + \tau_{em}(t) \\ \tau_{em}^{min}(rpm(t)) \leq \tau_{em}(t) \leq \tau_{em}^{max}(rpm(t)) \\ \tau_{ice}^{min}(rpm(t)) \leq \tau_{ice}(t) \leq \tau_{ice}^{max}(rpm(t)) \end{cases} \quad (5.1)$$

Si nota come i vincoli che descrivono i limiti di coppia siano *tempovarianti*, a causa della dipendenza temporale degli rpm.

5.2.2 Funzione di obiettivo

La funzione obiettivo da minimizzare calcola il costo istantaneo complessivo richiesto per erogare la coppia richiesta (5.4), applicando dei costi variabili alle coppie erogate dai due propulsori al variare dello stato ed un valore di soglia,

$$J(t) = f_{ice}(SOC(t), SOC_{lim}) \cdot \tau_{ice}(t) + f_{em}(SOC(t), SOC_{lim}) \cdot \tau_{em}(t) \quad (5.2)$$

dove $f_{ice}(SOC(t), SOC_{lim})$ e $f_{em}(SOC(t), SOC_{lim})$ rappresentano il costo della coppia erogata dal motore endotermico e dal motore elettrico in funzione dello stato di carica corrente e della soglia imposta su di esso (SOC_{lim}) che rappresenta un valore di barriera rispetto al quale l'utilizzo del motore elettrico deve essere sfavorito (5.3).

$$\begin{cases} f_{em}(SOC, SOC_{lim}) = f_{ice}(SOC, SOC_{lim}) & \text{se } SOC = SOC_{lim} \\ f_{em}(SOC, SOC_{lim}) < f_{ice}(SOC, SOC_{lim}) & \text{se } SOC > SOC_{lim} \\ f_{em}(SOC, SOC_{lim}) > f_{ice}(SOC, SOC_{lim}) & \text{se } SOC < SOC_{lim} \end{cases} \quad (5.3)$$

Per evitare che, al raggiungimento dello stato di carica limite, la macchina elettrica venga bruscamente disattivata causando una repentina variazione della richiesta di coppia al motore endotermico e conseguentemente del segnale di throttle, viene introdotta una condizione di smoothing che impone un limite superiore alla variazione di SOC (ΔSOC) tendente a zero al raggiungimento del valore di barriera (5.4)

$$\begin{aligned} \Delta SOC &< \varepsilon(SOC(t), SOC_{lim}), \\ \text{con} \\ \Delta SOC &= \widehat{SOC}(t) - SOC(t), \\ \lim_{SOC \rightarrow SOC_{lim}} \varepsilon(SOC, SOC_{lim}) &= 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

dove $SOC(t)$ è lo stato di carica della batteria al momento del calcolo dello split di coppia e $\widehat{SOC}(t)$ quello stimato dopo la sua erogazione (ovvero lo stato di carica iniziale al passo successivo). Questa condizione permette di gestire in modo opportuno l'intorno del punto di disattivazione della macchina elettrica, evitando brusche oscillazioni del segnale di throttle generato. Si osserva tuttavia che il valore di soglia imposto sullo stato di carica, come nel caso del fattore di equivalenza nel metodo ECMS, è fortemente dipendente dalla tipologia di tracciato, pertanto esso viene periodicamente adattato incrementandolo di una quantità dipendente dalla differenza tra l'energia caricata e scaricata nell'intervallo di osservazione ($[T_o^s, T_o^e]$), nel tentativo di ottenere un bilancio energetico nullo entro una soglia di tolleranza ($|SOC(T_o^s) - SOC(T_o^e)| < \zeta$).

5.2.3 Ottimizzazione

Osservando il modello e la funzione di costo, si nota come il vincolo $\tau_r(t) = \tau_{ice}(t) + \tau_{em}(t)$ permetta di esprimere il modello rispetto alla variabile τ_{ice} , indicante l'utilizzo del motore endotermico. Ciò risulta significativo per l'applicazione di questa metodologia in tempo reale, in quanto il calcolo

dei valori di coppia, riducendosi all'ottimizzazione vincolata di una funzione a variabile singola, può essere in un tempo molto limitato con svariati approcci [27]. Nel caso specifico, essendo la funzione obiettivo fortemente dipendente dalla tipologia di funzioni di costo utilizzate (f_{ice} e f_{em}) che possono provocare la generazione di punti angolosi, viene usato un approccio di minimizzazione basato sul *metodo della sezione aurea* [28] che, non richiedendo la derivazione della funzione obiettivo, può essere applicato in presenza di funzioni discontinue, garantendo inoltre delle ottime prestazioni dal punto di vista del tempo di calcolo. Per applicare questa metodologia è tuttavia necessario incorporare i vincoli nella funzione di costo, per avere un problema di ottimizzazione non vincolata a variabile singola. Ciò è ottenibile esprimendo i vincoli del modello (5.1) mediante la funzione di massimo ($\max(\cdot, 0)$) ed associando ad essi un valore di penalità in modo che il valore della nuova funzione obiettivo aumenti qualora essi vengano violati:

$$\widehat{J}(t_{ice}) = J(t) + \mathbf{A} \cdot \mathbf{G}(t_{ice}), \quad (5.5)$$

dove \mathbf{G} e \mathbf{A} sono vettori rappresentanti i vincoli e i relativi costi. Nel caso in esame la nuova funzione di costo espressa in funzione della coppia erogata dal motore endotermico sarà data dalla seguente (5.6)

$$\begin{aligned} \widehat{J}(t_{ice}) = & f_{ice}(SOC(t), SOC_{lim}) \cdot \tau_{ice}(t) \\ & + f_{em}(SOC(t), SOC_{lim}) \cdot \tau_{em}(t) + \\ & + \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} \max(SOC_{min} - SOC(t), 0) \\ \max(SOC(t) - SOC_{max}, 0) \\ \max(\tau_{ice}^{min} - \tau_{ice}(t), 0) \\ \max(\tau_{ice}(t) - \tau_{ice}^{max}, 0) \\ \max(\tau_{em}^{min} - \tau_{em}(t), 0) \\ \max(\tau_{em}(t) - \tau_{em}^{max}, 0) \\ \max(\Delta SOC - \varepsilon(SOC(t), SOC_{lim}), 0) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5.6)$$

dove τ_{em} è dato dalla (5.7), esprimendo quindi il vincolo di raggiungimento della coppia richiesta.

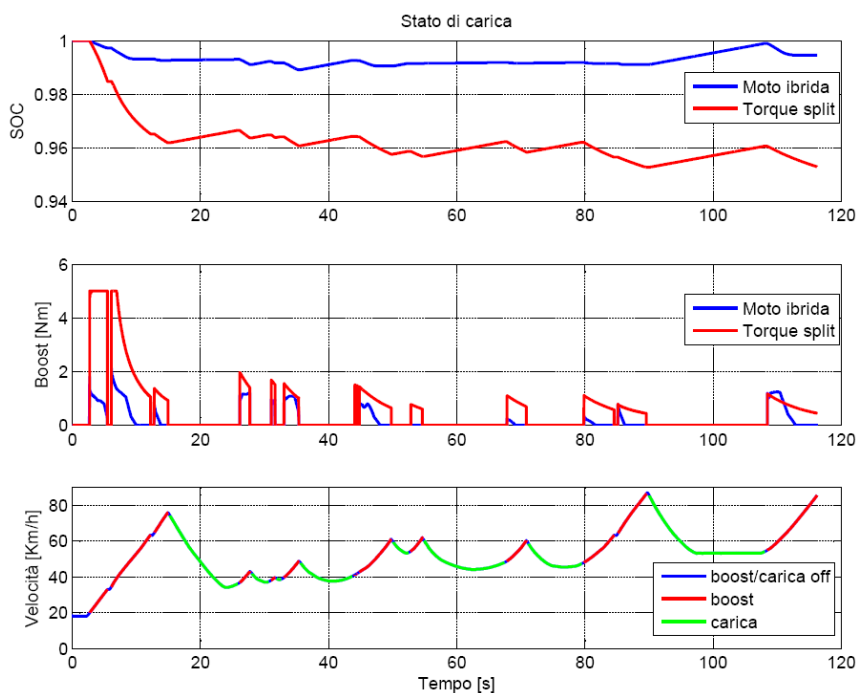
$$\tau_{em} = \tau_r - \tau_{ice}. \quad (5.7)$$

La procedura di ottimizzazione fornirà quindi il valore di τ_{ice} che permette di minimizzare la funzione obiettivo e da esso il corrispondente valore di τ_{em} che possono quindi essere utilizzare per comandare i propulsori. Nello specifico, il blocco *adaptive splitter* (Figura 4.10), qualora abilitato,

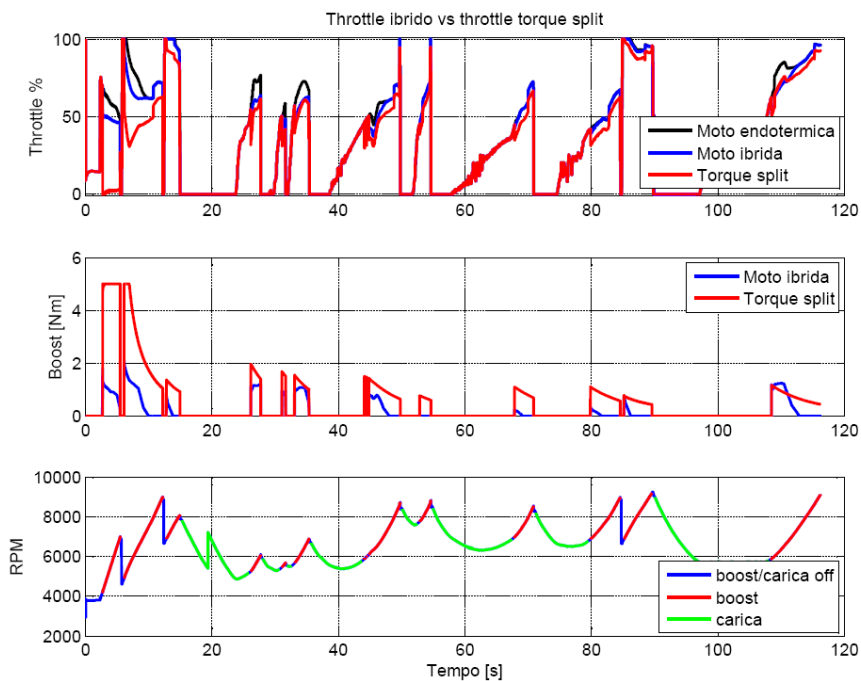
implementa questa procedura, calcolando mediante la procedura di interpolazione sulla caratteristica coppia-rpm del motore ibrido (Figura 2.8), il valore di coppia richiesto dal pilota in funzione dell'apertura dell'acceleratore. Una volta ottenuto lo split di coppia, sfruttando la caratterizzazione del motore endotermico, il valore τ_{ice} viene convertito nel corrispondente valore di throttle che verrà utilizzato dal sottosistema rappresentante il motore endotermico. Per quanto riguarda la macchina elettrica, il blocco che la rappresenta è stato modificato in modo da fornire, qualora la procedura di torque split sia attiva, il valore τ_{em} calcolato. L'algoritmo 5 riporta la struttura del blocco che realizza la strategia adattiva descritta in questa sezione.

5.2.4 Risultati

L'approccio torque split è stato testato su un ciclo di guida misto realizzato in circuito (imponendo una strategia di ricarica a 2C e un livello di soglia dello stato di carica pari al 95%), confrontando i risultati con quelli ottenuti dal motociclo con questa funzionalità disabilitata (Figura 5.2). Osservando i valori di coppia erogata dal motore elettrico al variare del regime di giri (Figura 5.2b) si nota come, rispetto alla moto ibrida senza la funzionalità di torque split, essa risulti notevolmente superiore (raggiungendo nelle fasi iniziali il massimo valore di coppia erogabile dal motore elettrico) ottenendo un'ulteriore riduzione dell'utilizzo del motore endotermico. Inoltre, essendo il motore endotermico gestito dalla sistema di torque split mediante la generazione del segnale di un apposito segnale di throttle corretto, emerge come il controllo in esame risulti totalmente trasparente al pilota che non subisce pertanto ripercussioni dirette mantenendo una richiesta di acceleratore analoga a quella del motociclo privo del sistema di ottimizzazione. Questo comportamento è favorito dal vincolo di smoothing, come si nota dall'andamento del boost erogato che, all'avvicinarsi dello stato di carica alla soglia limite, si riduce gradualmente, evitando il crearsi di repentini cali di potenza (Figura 5.2a). Infine, osservando l'andamento dello stato di carica, esso rimane superiore alla soglia limite stabilita, evidenziando come il bilancio energetico, in particolar modo nella seconda parte del circuito, sia sostanzialmente in equilibrio raggiungendo il trade off tra mantenimento dell'autonomia e riduzione del utilizzo del motore endotermico previsto. Dalla figura 5.2a appare che lo stato di carica si mantiene attorno al limite inferiore scelto, comportamento dovuto principalmente alla brevità del ciclo di guida di test, che non permette di apprezzare l'adattamento della soglia di carica minima, limitando le oscillazioni dello stato di carica attorno al valore minimo previsto.



(a) SOC, coppia di boost e velocità su un ciclo di guida misto senza e con torque split



(b) Confronto tra i segnali di throttle della moto ibrida senza e con torque split

Figura 5.2: Risultati della simulazione dinamica con ottimizzazione su un ciclo di guida misto.

Algoritmo 5 splitter adattivo

```

/* impostazione valori iniziali */
if  $\nexists$  timer then
  timer  $\leftarrow$  observationTime
   $dSOC_{lim} \leftarrow 0$ 
   $SOC_{t-1} \leftarrow 1$ 
  charge  $\leftarrow 0$ 
  discharge  $\leftarrow 0$ 
end if
 $SOC \leftarrow (batteryEnergyLevel_t / MaxEnergy)$ 
 $dSOC \leftarrow SOC - SOC_{t-1}$ 
 $SOC_{t-1} \leftarrow (batteryEnergyLevel_t / MaxEnergy)$ 
if  $dSoc < 0$  then
  discharge  $\leftarrow discharge + |dSOC|$ 
else
  charge  $\leftarrow charge + dSOC$ 
end if
timer  $\leftarrow timer - 1$ 
if timer = 0 then
   $dEergy \leftarrow discharge - charge$ 
   $dSOC_{lim} \leftarrow dEergy / 2$ 
  charge  $\leftarrow 0$ 
  discharge  $\leftarrow 0$ 
  timer  $\leftarrow observationTime$ 
end if
if optimizer  $\wedge$  boostEnabled then
   $\tau_r \leftarrow interp(throttle, maxMinHybridEngineTorque)$ 
   $\tau_{ice} \leftarrow powerSplit(\tau_r, (SOC_{lim} + dSOC_{lim}), SOC)$ 
   $trottleEndotermic \leftarrow interp(maxMinEngineTorque, \tau_{ice})$ 
   $\tau_{em} \leftarrow \tau_r - \tau_{ice}$ 
else
   $\tau_{em} \leftarrow 0$ 
   $trottleEndotermic \leftarrow throttle$ 
end if

```

Conclusioni e sviluppi futuri

Una delle parti fondamentali del lavoro svolto è stata la realizzazione e l'aggiornamento della simulazione statica, che ha permesso di validare il dimensionamento precedentemente realizzato valutando gli andamenti medi di tensione e corrente in fase di ricarica. La modellazione degli accumulatori ha inoltre evidenziato come nella parte finale della ricarica, al raggiungimento della massima tensione ai poli, sia caratterizzata dal rapido decadimento delle potenze di ricarica, aumentando quindi le difficoltà riguardanti il raggiungimento del vincolo di piena carica al termine del ciclo di guida. Si osserva tuttavia che l'energia immagazzinata nella parte finale della ricarica rappresenta in generale una piccola porzione dell'energia totale, rendendo quindi accettabili valori di stato di carica compresi tra il 90% e il 100% alla fine del ciclo di guida. Inoltre, la successiva realizzazione della cosimulazione basata sul tool VI-BikeRealTime ha permesso di realizzare un ambiente di virtual prototyping completo e modulare che estende le funzionalità del software fornito da Vi-grade mediante una specifica modellazione del motore ibrido e dei sistemi di controllo mantenendo delle ottime prestazioni dal punto di vista del tempo di calcolo. L'introduzione delle interfacce grafiche ha permesso di completare l'ambiente virtuale realizzato, rendendo agevole la configurazione dei principali parametri di interesse, la gestione delle varie funzionalità di controllo realizzate e l'analisi preliminare del comportamento del veicolo. Essendo totalmente parametrizzato, l'ambiente simulativo può essere facilmente adattato a diverse tipologie di motocicli rendendolo molto flessibile. Sfruttando l'ambiente di virtual prototyping realizzato, sono state ulteriormente validate le considerazioni ottenute dalla simulazione statica evidenziando inoltre come la presenza della macchina elettrica permetta, a parità di velocità, di ridurre l'utilizzo del motore endotermico e conseguentemente dei consumi in fase di acce-

lerazione, migliorando inoltre le prestazioni della motocicletta. Infine, è stata proposta una strategia adattiva di gestione dei propulsori, orientata alla minimizzazione dell'utilizzo del motore endotermico e, al contempo, al mantenimento dello stato di carica della batteria attorno ad un valore di soglia stabilito, che ha permesso di incrementare l'utilizzo del motore elettrico e lo sfruttamento della batteria. Le simulazioni svolte con l'utilizzo di questa funzionalità hanno dimostrato come, mantenendo la massima trasparenza rispetto al pilota, essa possa ridurre ulteriormente i consumi, incrementando l'utilizzo della macchina elettrica agli alti regimi di giri.

Per quanto riguarda i possibili sviluppi futuri, sfruttando l'ambiente di virtual prototyping realizzato, risulta interessante realizzare mappature di boost differenti, per le quali è già stato realizzato un opportuno sistema di gestione, verificando le prestazioni ottenute dal veicolo con strategie di intervento della macchina elettrica più o meno conservative. Inoltre, sfruttando gli studi realizzati in [29, 30, 31] in cui vengono presentati delle interessanti feature per l'identificazione delle condizioni di guida, risulta interessante realizzare un sistema che, sfruttando le tecniche di machine learning, sia in grado di adattare l'erogazione del boost alla tipologia di percorso e di guida, selezionando automaticamente la mappatura di boost più adatta. Per ottenere delle informazioni più dettagliate in merito al comportamento delle componenti elettriche, la cosimulazione verrà inoltre aggiornata introducendo il modello della macchina elettrica utilizzata per la realizzazione del prototipo. Infine l'approccio di torque split, avendo mostrato risultati promettenti, verrà raffinato introducendo modelli e sistemi di ottimizzazione più raffinati.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Alessandro Beghi, mio relatore, e l'Ing. Fabio Maran, mio correlatore, per la disponibilità e le numerose ore dedicatemi durante questi mesi di collaborazione. Ringrazio inoltre l'Ing. Mirco Rampazzo e l'Ing. Andrea Masiero per il prezioso supporto ed i numerosi incoraggiamenti fornitimi nell'affrontare alcune delle problematiche incontrate nella realizzazione del progetto. Desidero inoltre ringraziare Davide e Roberto di Vi-grade per la disponibilità ed il tempo dedicatomi durante la realizzazione della cosimulazione. Un sentito ringraziamento va agli amici di sempre, ai compagni di corso e ai colleghi di laboratorio per le belle giornate passate assieme che hanno in parte alleviato i momenti difficili passati in nel corso del percorso di studi. Un ringraziamento speciale va infine ai miei genitori, alla mia famiglia e alla mia ragazza Alessandra, per avermi sostenuto e supportato nel corso di questi anni di studi ed in particolar modo nel corso della tesi.

8.1 Funzioni di preelaborazione

8.1.1 getChargePol

```
%OUTPUT
%pev: polinomio che descrive la tensione in funzione
%     dell'energia
%pei: polinomio che descrive la corrente in funzione
%     dell'energia
%powerCharge: vettore contenente il campionamento
%             della potenza di carica istantanea nel tran-
%             sitorio di tensione
%powerChargeI: vettore contenente il campionamento
%              della potenza di carica istantanea nel tran-
%              sitorio di corrente
%enVcost: energia al termine del transitorio di
%         tensione
%enDispMax: energia disponibile totale
%INPUT
%fileNameV: nome file con i campioni della curva
%           di tensione
%fileNameI: nome file con i campioni della curva
%           di corrente
%Tc: tempo di campionamento
%grad: grado del polinomio interpolatore
%vCut: tensione di cutoff
%iCharge: corrente di carica costante
%vCharge: tensione massima di carica
```

```

function [pev,pei,powerCharge,powerChargeI,enVcost,...
        enDispMax]=getChargePol(fileNameV,fileNameI,Tc,...
        grad,vCut,iCharge,vCharge)

debug=0;
spm=60;
% curva di carica tensione - tempo
ChargeCurve = load(fileNameV);
x=ChargeCurve(:,1)*spm;
y=ChargeCurve(:,2);
chargeCurveI=load(fileNameI);
x_i=chargeCurveI(:,1)*spm;
y_i=chargeCurveI(:,2);
% potenza di carica istantanea
chargePower_t=iCharge*y;
% polinomi rappresentanti tensione e potenza di carica
% in funzione del tempo nella zona di carica a corrente
% costante
p=polyfit(x,y,grad);
pp=polyfit(x,chargePower_t,grad);
% curva di potenza campionata in funzione del tempo di
% campionamento.
powerCharge=polyval(pp,x(1):Tc:x(end));
% calcolo energia istantanea disponibile
% ((v(t)-vCut)*iCharge)in funzione del tempo.
pe=polyint(pp);
energy_t=1e-3*((polyval(pe,x)-(vCut*iCharge)*x)...
        -polyval(pe,x(1)));
% polinomio rappresentante la curva tensione energia
% residua disponibile
pev=polyfit(energy_t,y,grad);
% polinomio rappresentante la corrente nel tempo
pc=polyfit(x_i,y_i,grad);
%campionamento potenza nel transitorio finale
powerChargeI=vCharge*polyval(pc,x_i(1):Tc:x_i(end));
%calcolo l'energia nel transitorio finale
pq=polyint(pc);
Q=polyval(pq,x_i(end))-polyval(pq,x_i(1));
Q_t=polyval(pq,x_i)-polyval(pq,x_i(1));
et=Q*(vCharge-vCut)*1e-3;
en_t=Q_t*(vCharge-vCut)*1e-3;
en_t=en_t+energy_t(end);

```

```

pei=polyfit(en_t , y_i , grad);
%energia disponibile totale e a fine transitorio
% di tensione in [Kj]
enDispMax=(energy_t(end)+et);
enVcost=energy_t(end);

p(end)=y(1);
if(debug)
    % verifica dell'andamento del polinomio che
    % rappresenta la curva di carica V - t
    hold on;
    plot(x,y);
    f=polyval(p,x);
    plot(x,f);
    hold off;
    % verifica dell'andamento del polinomio che
    % rappresenta la curva di carica V(t) - E(t)
    figure
    hold on;
    plot(energy_t,y);
    fe=polyval(pev,energy_t);
    plot(energy_t,fe);
    hold off;
    % tensione ed energina in funzione del tempo.
    figure
    hold on;
    plot(x,y);
    plot(x,energy_t);
    hold off;
    % valutazione polinomio approssimazione
    % corrente di scarica.
    figure
    hold on;
    plot(x_i,y_i);
    plot(x_i,polyval(pc,x_i));
    hold off;
end

```

8.1.2 getDischargePol

```

%function getDischargePol(fileName,grad)
%p:polinomio stato di scarica-tensione
%maxBattPower: Ah reali della batteria
%fileName: nome file della curva di scarica

```

```

% campionata
%grad: grado del polinomio interpolatore
function [p,maxBattPower]=...
    getDischargePol(fileName,grad)
debug=0;
DischargeCurve = load(fileName);
x=DischargeCurve(:,1);
y=DischargeCurve(:,2);
p=polyfit(x,y,grad);
p(end)=y(1);
maxBattPower=x(end);
if(debug)
    hold on;
    plot(x,y);
    f=polyval(p,x);
    plot(x,f);
    hold off;
end

```

8.1.3 getPowerPol

```

%OUTPUT
%pp: polinomio potenza-tempo nella fase di
%    carica a corrente costante
%pp_inv: polinomio tempo-potenza nella fase di
%    carica a corrente costante
%ppi: polinomio potenza-tempo nella fase di
%    carica a tensione costante
%ppi_inv: polinomio tempo-potenza nella fase di
%    carica a tensione costante
%tVcost: tempo al raggiungimento della tensione cos-
%    tante
%tCharge: tempo al termine della carica
%INPUT
%fileNameV: nome file con i campioni della curva di
%    tensione
%fileNameI: nome file con i campioni della curva di
%    corrente
%grad: grado del polinomio interpolatore
%iCharge: corrente di carica costante
%vCharge: tensione massima di carica
function [pp,pp_inv,ppi,ppi_inv,tVcost,tCharge]=...
    getPowerPol(fileNameV,fileNameI,grad, ...
    iCharge,vCharge)

```

```

spm=60;
% curva di carica tensione - tempo
ChargeCurve = load(fileNameV);
x=ChargeCurve(:,1)*spm;
y=ChargeCurve(:,2);
chargeCurveI=load(fileNameI);
x_i=chargeCurveI(:,1)*spm;
y_i=chargeCurveI(:,2);
% potenza di carica istantanea
chargePower_t=iCharge*y;
% polinomi rappresentanti tensione e potenza di
% carica in funzione del tempo nella zona di
% carica a corrente costante
p=polyfit(x,y,grad);
pp=polyfit(x,chargePower_t,grad);
pp_inv=polyfit(chargePower_t,x,grad);
% polinomio rappresentante la corrente nel tempo
pc=polyfit(x_i,y_i,grad);
%campionamento potenza nel transitorio finale
chargePowerI=vCharge*y_i;
ppi=polyfit(x_i,chargePowerI,grad);
ppi_inv=polyfit(chargePowerI,x_i,grad);
%powerCharge=[powerCharge,chargePowerI];
tVcost=x(end);
tCharge=x_i(end);

```

8.2 Funzioni di calcolo

8.2.1 getChargeVoltage

```

%OUTPUT
%y: tensione a poli in fase di carica
%INPUT
%pol: polinomio tensione-energia
%energy_t: energia attuale
%enVcost: energia al termine del transitorio di
%         tensione
%vCharge: tensione massima della batteria
function[y]= getChargeVoltage...
              (pol,energy_t,enVcost,vCharge)
y=0;
if(energy_t >= enVcost)
    y=vCharge;

```

```

else
    y=polyval(pol,energy_t);
end

```

8.2.2 getChargeCurrent

```

%OUTPUT
%y: corrente di ricarica
%INPUT
%pol: polinomio energia-corrente
%energy_t: energia attuale nella batteria
%enTot: energia della batteria alla massima carica
function [y]= getChargeCurrent(pol,energy_t,enTot)
y=0;
if(energy_t >= enTot)
    y=0;
else
    y=polyval(pol,energy_t);
end

```

8.2.3 getDischargeVoltage

```

%OUTPUT
%y: tensione ai poli in fase di scarica
%INPUT
%pol: polinomio stato di scarica-tesnione
%soc: stato di carica attuale
%maxBattPower: Ah della batteria
function [y] = getDischargeVoltage...
            (pol,soc,maxBattPower)
x=(1-soc)*maxBattPower;
y=polyval(pol,x);

```

8.2.4 getTimePower

```

% OUTPUT
%t: tempo
%INPUT
%pol_t_P: polinomio tempo-potenza ad inizio
%         carica
%power_t: potenza al tempo t
function t = getTimePower(pol_t_P,power_t)
t=polyval(pol_t_P,power_t);

```


8.2.5 getPower

```
%INPUT
%pol_P_t: polinomio Potenza-tempo
%t: tempo
%OUTPUT
%power_t: potenza al tempo t
function power_t = getPower(pol_P_t,t)
power_t=polyval(pol_P_t,t);
```

8.2.6 getTimePowerI

```
% OUTPUT
%t: tempo
%INPUT
%pol_t_P: polinomio tempo-potenza a fine
%        carica
%power_t: potenza al tempo t
function t = getTimePowerI(pol_t_PI,power_t)
t=polyval(pol_t_PI,power_t);
```

8.2.7 getPowerI

```
%INPUT
%pol_P_t: polinomio Potenza-tempo
%t: tempo
%tCharge: tempo di fine ricarica
%OUTPUT
%power_t: potenza al tempo t
function power_t = getPowerI(pol_P_t,t,tCharge)
power_t=0;
if(t<tCharge)
    power_t=polyval(pol_P_t,t);
end
```


Bibliografia

- [1] European Union, “Background on energy in europe,” in *European Council*, 4 February 2011.
- [2] C. C. Chan, “The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, pp. 704–718, Apr. 2007.
- [3] C. Chan, a. Bouscayrol, and K. Chen, “Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, pp. 589–598, Feb. 2010.
- [4] M. Ehsani, Y. Gao, and J. M. Miller, “Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, pp. 719–728, Apr. 2007.
- [5] a. Emadi, K. Rajashekara, S. Williamson, and S. Lukic, “Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, pp. 763–770, May 2005.
- [6] “Aprilia RS4 125 - www.it.aprilia.it.”
- [7] M. Ferrari, *Propulsione Ibrida Motociclistica: studio di fattibilità per la realizzazione di un prototipo*. PhD thesis, Padova, 2010.
- [8] “Kokam web site - www.kokam.com.”
- [9] G. Marangon, *Battery Management Systems for Li-ion Batteries in Hybrid Electric Vehicles*. PhD thesis, Padova, 2010.

- [10] T. Lee, Y. Kim, A. Stefanopoulou, and Z. Filipi, "Hybrid electric vehicle supervisory control design reflecting estimated lithium-ion battery electrochemical dynamics," in *American Control Conference (ACC), 2011*, (San Francisco, CA, USA), pp. 388–395, IEEE, 2011.
- [11] Y. Li, R. Anderson, J. Song, A. Phillips, and X. Wang, "A nonlinear adaptive observer approach for state of charge estimation of lithium-ion batteries," in *American Control Conference (ACC), 2011*, (San Francisco, CA, USA), pp. 370–375, IEEE, 2011.
- [12] F. González-Longatt, "Circuit Based Battery Models: A Review," in *2DO CONGRESO IBEROAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (II CIBELEC 2006)*, 2006.
- [13] R. Dougal, "Dynamic lithium-ion battery model for system simulation," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 25, pp. 495–505, Sept. 2002.
- [14] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, and R. Bornatico, "Model-based calibration for battery characterization in HEV applications," in *American Control Conference, 2008*, (Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA), pp. 318–325, IEEE, June 2008.
- [15] X. Hu, F. Sun, Y. Zou, and H. Peng, "Online estimation of an electric vehicle Lithium-Ion battery using recursive least squares with forgetting," in *American Control Conference (ACC), 2011*, (San Francisco, CA, USA), pp. 935–940, IEEE, 2011.
- [16] M. Chen and G. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, pp. 504–511, June 2006.
- [17] M. Knauff, J. McLaughlin, C. Dafis, D. Niebur, P. Singh, H. Kwatny, and C. Nwankpa, "Simulink model of a lithium-ion battery for the hybrid power system testbed," in *Proceedings of the ASNE Intelligent Ships Symposium*, pp. 1–8, 2007.
- [18] T. Hu, B. Zanchi, and J. Zhao, "Determining battery parameters by simple algebraic method," in *American Control Conference (ACC), 2011*, (San Francisco, CA, USA), 2011.
- [19] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, and B. Yurkovich, "Electro-thermal battery model identification for automotive applications," *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 449–457, Jan. 2011.

- [20] “VI grade web site - www.vi-grade.com.”
- [21] A. Sciarretta and L. Guzzella, “Control of hybrid electric vehicles,” *Control Systems Magazine, IEEE*, vol. 27, pp. 60–70, Nov. 2007.
- [22] C. Musardo, G. Rizzoni, and B. Staccia, “A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management,” in *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1816–1823, IEEE, 2005.
- [23] M. Koot, J. Kessels, B. DeJager, W. Heemels, P. VandenBosch, and M. Steinbuch, “Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, pp. 771–782, May 2005.
- [24] J. T. B. A. Kessels, M. Koot, B. de Jager, P. P. J. van den Bosch, N. E. P. I. Aneke, and D. B. Kok, “Energy Management for the Electric Powernet in Vehicles With a Conventional Drivetrain,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, pp. 494–505, May 2007.
- [25] L. Fu, U. Ozguner, P. Tulpule, and V. Marano, “Real-time energy management and sensitivity study for hybrid electric vehicles,” in *American Control Conference (ACC), 2011*, pp. 2113–2118, IEEE, 2011.
- [26] S. J. Moura, H. K. Fathy, D. S. Callaway, and J. L. Stein, “A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, pp. 545–555, May 2011.
- [27] G. Zilli, L. Bergamaschi, and M. Venturin, “METODI DI OTTIMIZZAZIONE.” 2010.
- [28] Istituto per le Applicazioni del Calcolo M.Picone, “Metodo della sezione aurea per la minimizzazione di funzioni - www.na.iac.cnr.it/~bdv/sezioneaurea.pdf.”
- [29] S.-i. Jeon, S.-t. Jo, Y.-i. Park, and J.-m. Lee, “Multi-Mode Driving Control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Driving Pattern Recognition,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 124, no. 1, p. 141, 2002.

- [30] L. Kiliaris, M. Kuang, M. Masrur, A. Phillips, and Y. Murphey, “Intelligent Vehicle Power Control Based on Machine Learning of Optimal Control Parameters and Prediction of Road Type and Traffic Congestion,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, pp. 4741–4756, Nov. 2009.
- [31] M. Montazeri-Gh, A. Fotouhi, and A. Naderpour, “Driving patterns clustering based on driving features analysis,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 225, pp. 1301–1317, May 2011.