



**Politecnico
di Torino**



Advanced Dynamic Model of E-motor for Control Rapid Prototyping

Andrei Bojoi

Relatore: Gianmario Pellegrino

Correlatori: Paolo Pescetto, Anantaram Varatharajan

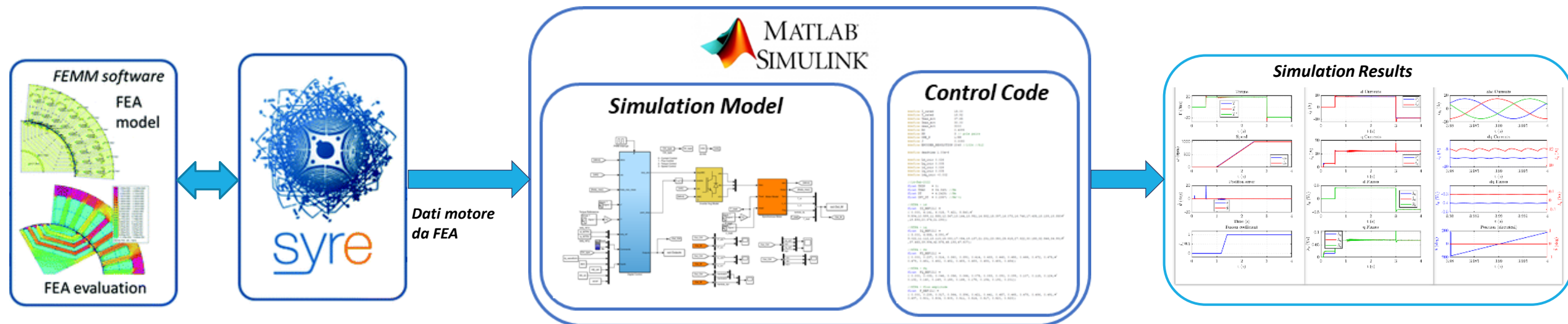




- Introduzione e obiettivi della tesi
- Modelli di motori sincroni proposti
- Risultati di simulazione PLECS+Simulink e confronto con FEA
- Validazione sperimentale
- Conclusioni



- **Obiettivo:** sviluppo di un modello circuitale di un azionamento elettrico adattabile per macchine sincrone a magneti permanenti e macchine sincrone a riluttanza
- **Integrazione del modello in SyR-e** = software per il design di motori elettrici:
 - Progettazione del motore e verifica delle prestazioni tramite l'analisi agli elementi finiti (FEA)
 - Generazione automatica del modello Simulink per la calibrazione del controllo

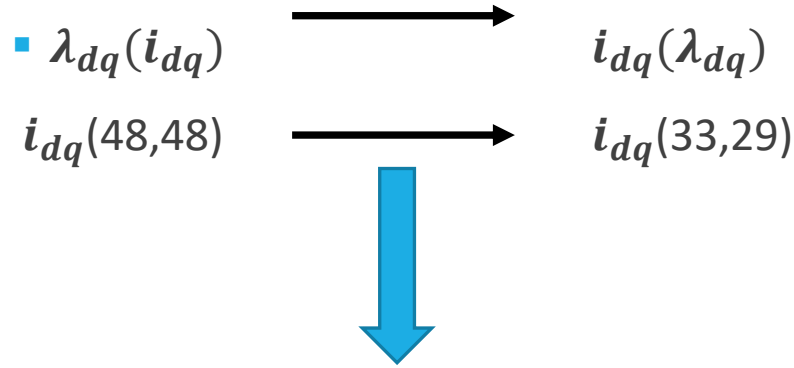


Open-Source



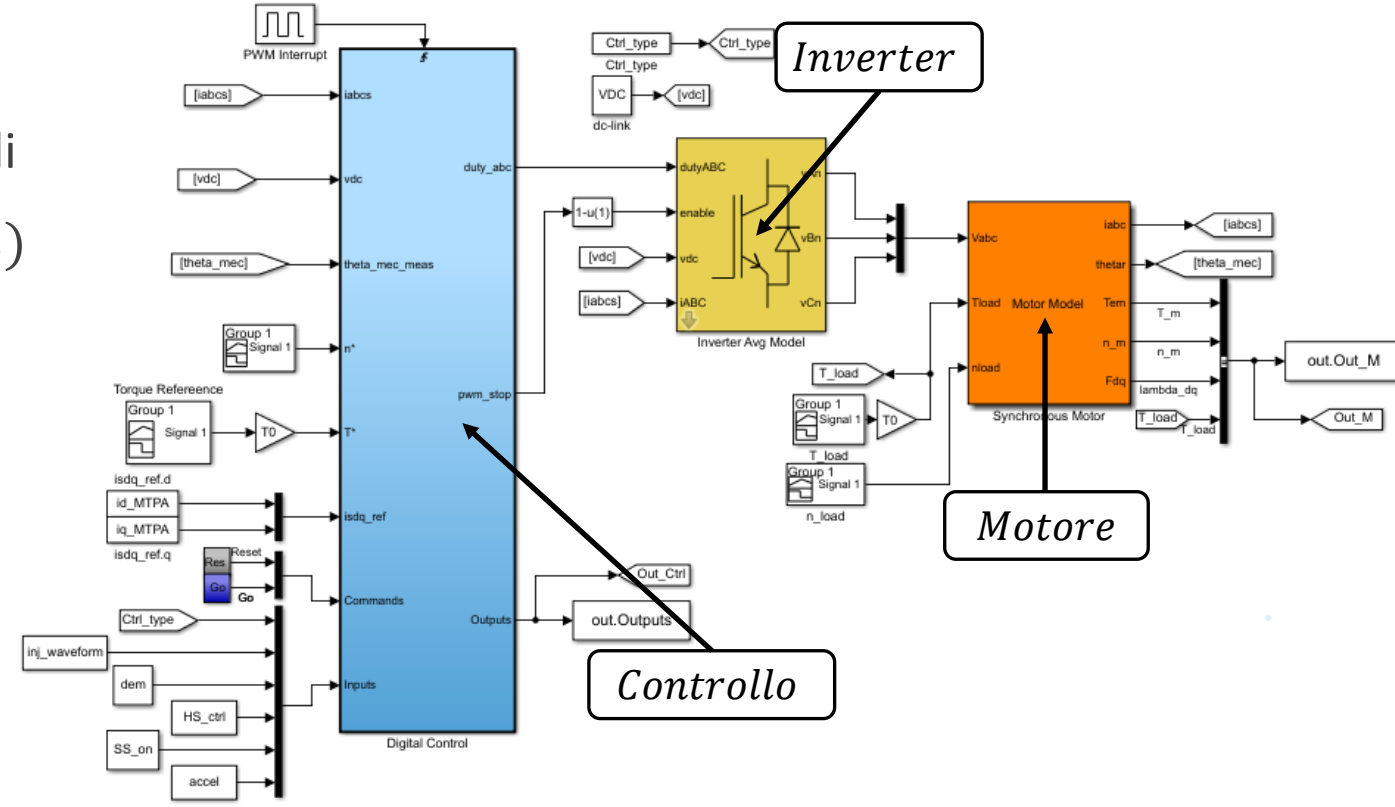
- **Modello attuale Simulink di SyR-e**

- Modello ai valori medi
- Modello motore ed inverter non circuitali
- Inversione delle mappe di flusso $\lambda_{dq}(i_{dq})$

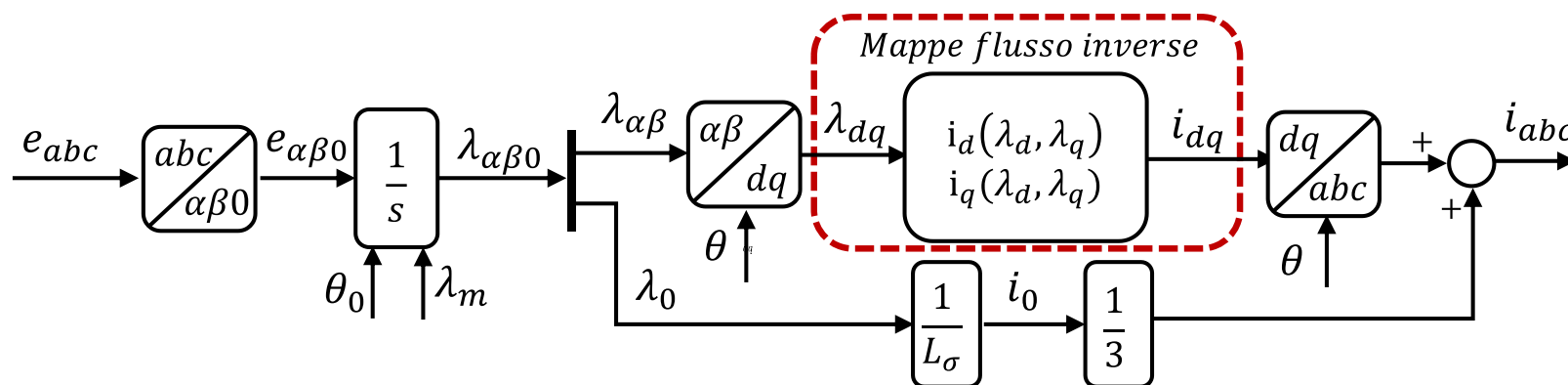
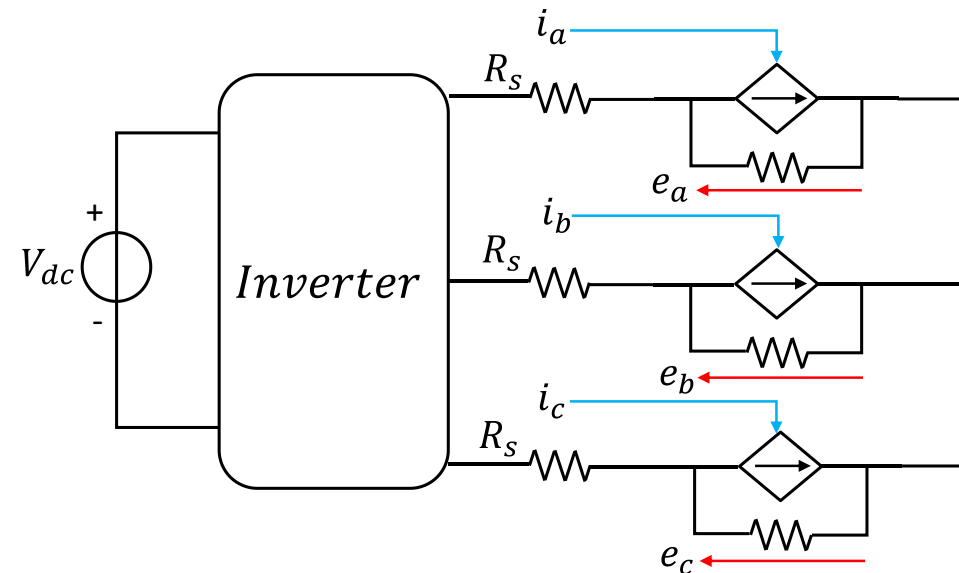


- **Obiettivi del nuovo modello:**

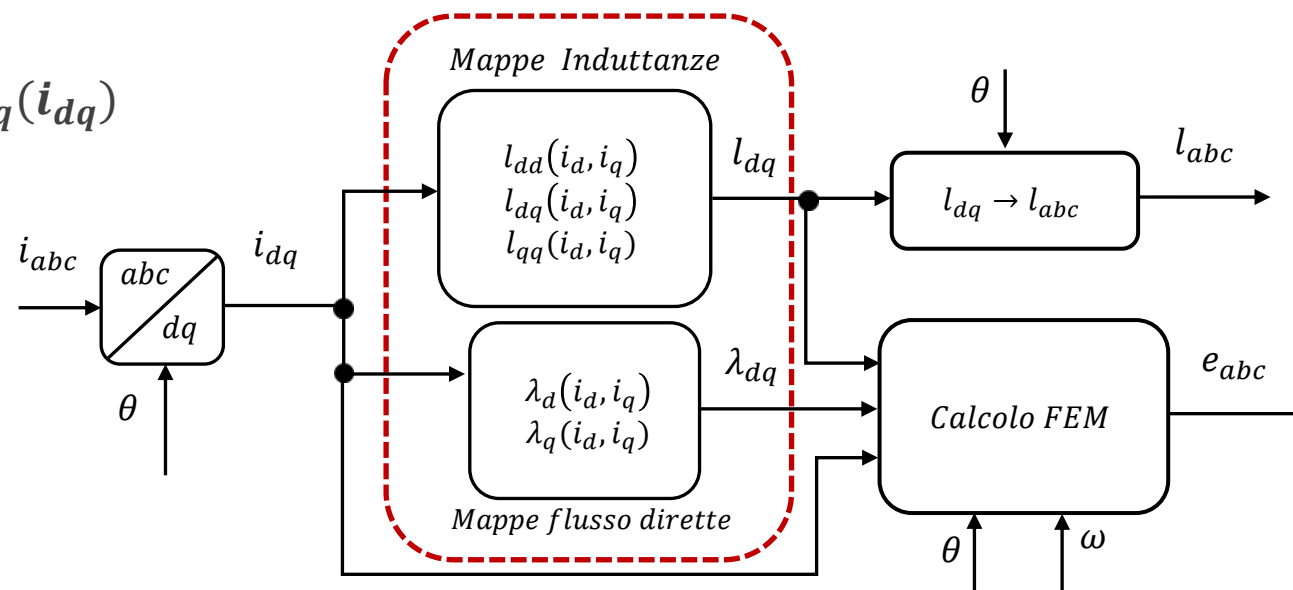
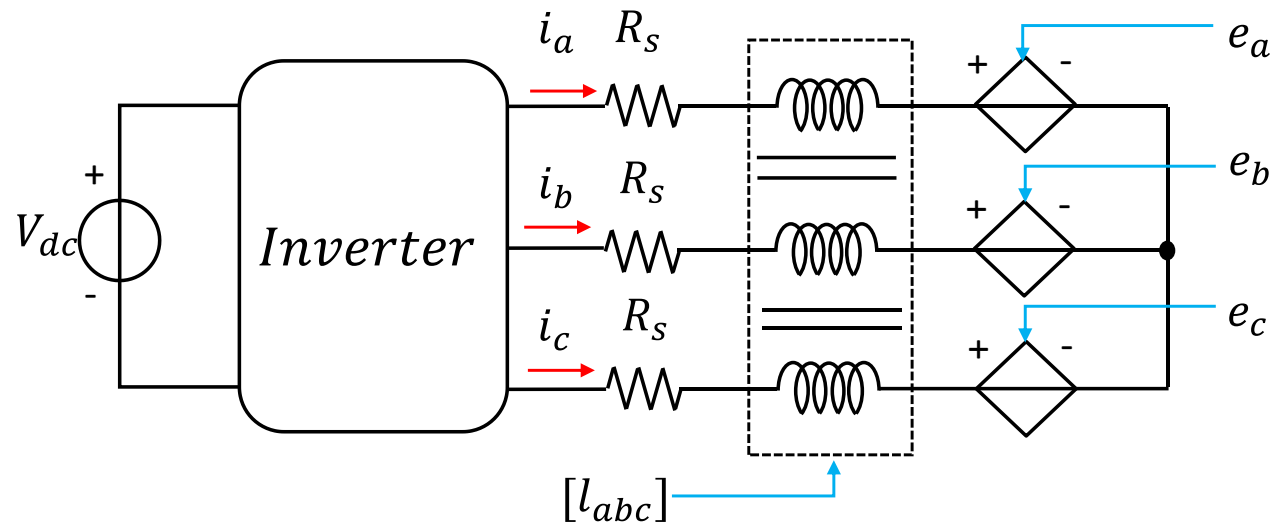
- Modello ai valori **istantanei o medi**
- **Modello circuitali** per l'analisi di guasti



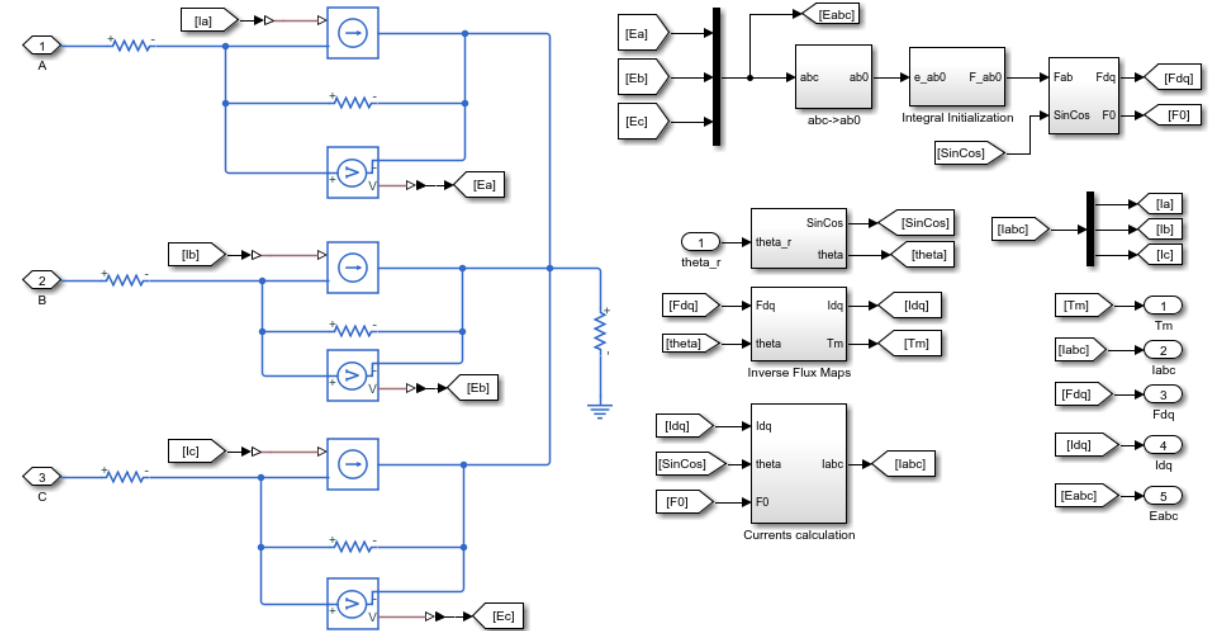
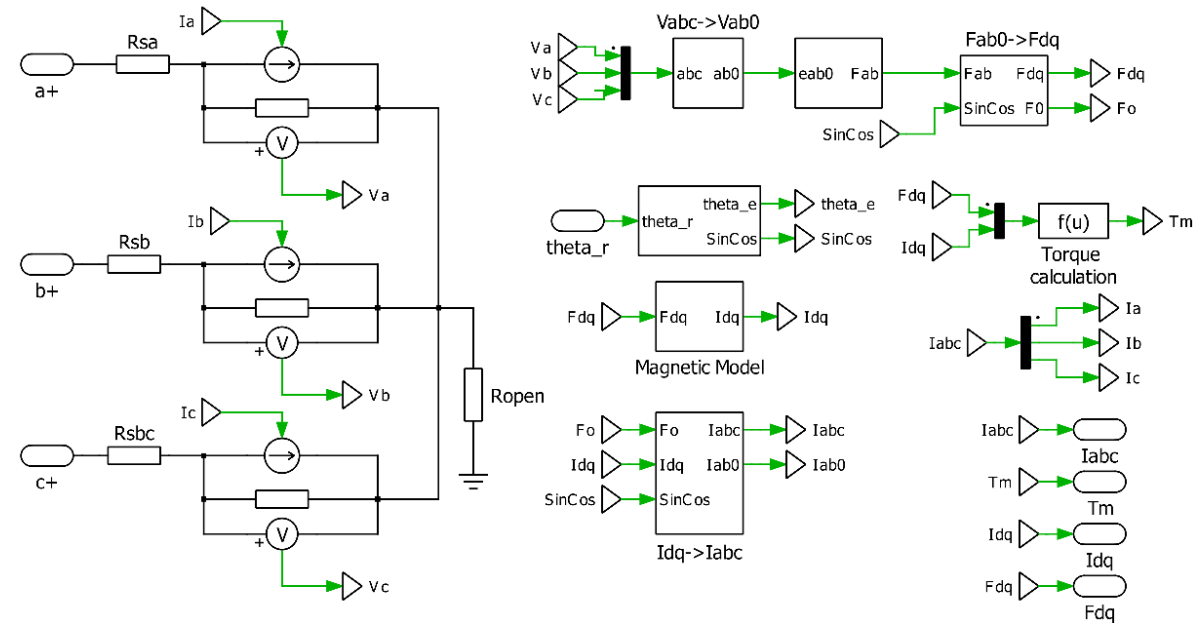
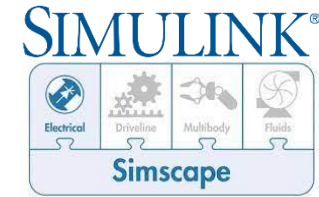
- **CCG = Controlled Current Generators:**
 - Tre generatori di corrente pilotati dalle correnti di fase calcolate dalle correnti i_{dq}
 - Flussi calcolati in assi stazionari (d, q) mediante l'integrazione delle forze elettromotrici in assi (α, β), seguito da una trasformazione di rotazione
 - Richiede
 - **Mappe di flusso inverse** $i_{dq}(\lambda_{dq})$ per calcolare le correnti i_{dq}



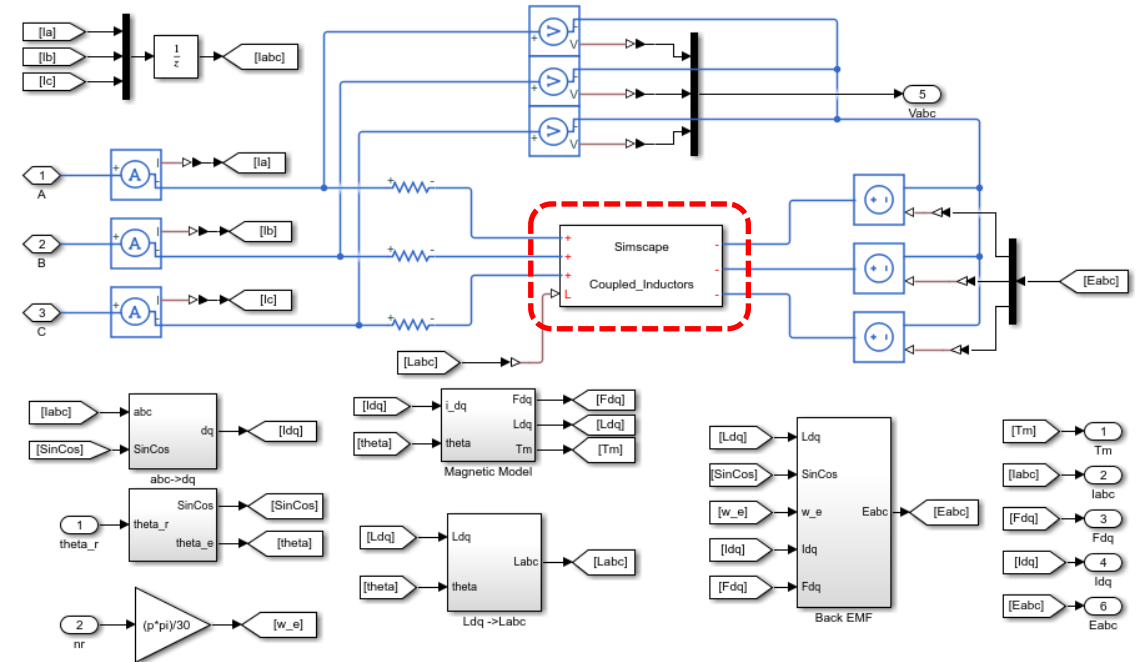
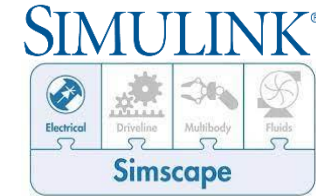
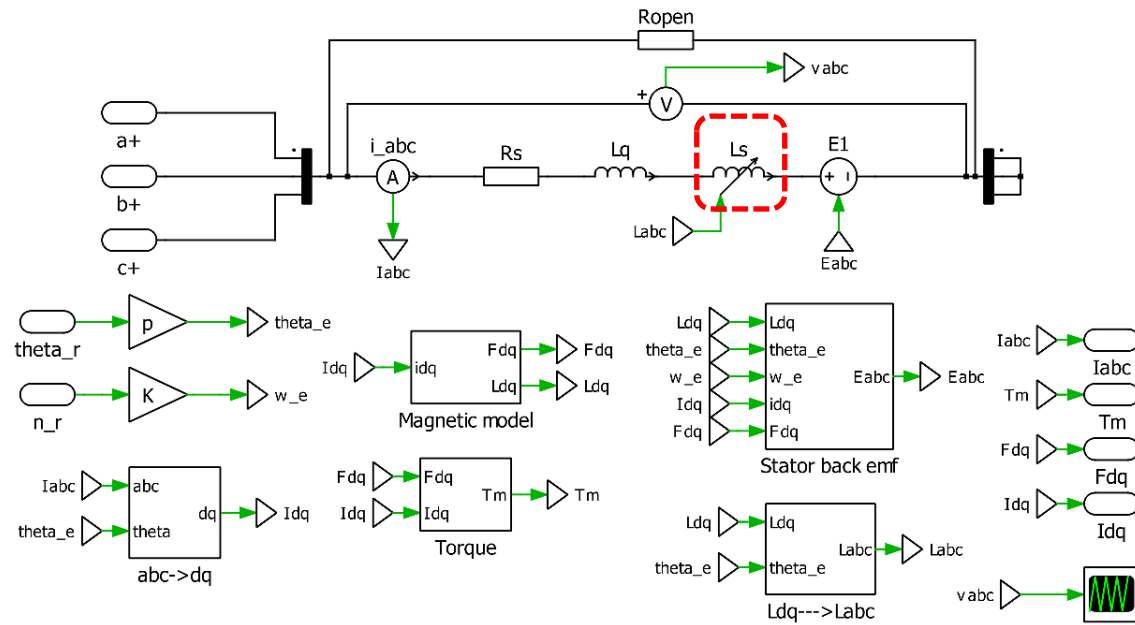
- **VBR = Voltage Behind Reactance**
 - Motore modellizzato come carico *RLE*
 - Induttori mutuamente accoppiati
 - Generatori di tensione per le forze elettromotrici
 - Richiede
 - Mappe di flusso dirette $\lambda_{dq}(i_{dq})$
 - Mappe di induttanze incremental $l_{dq}(i_{dq})$



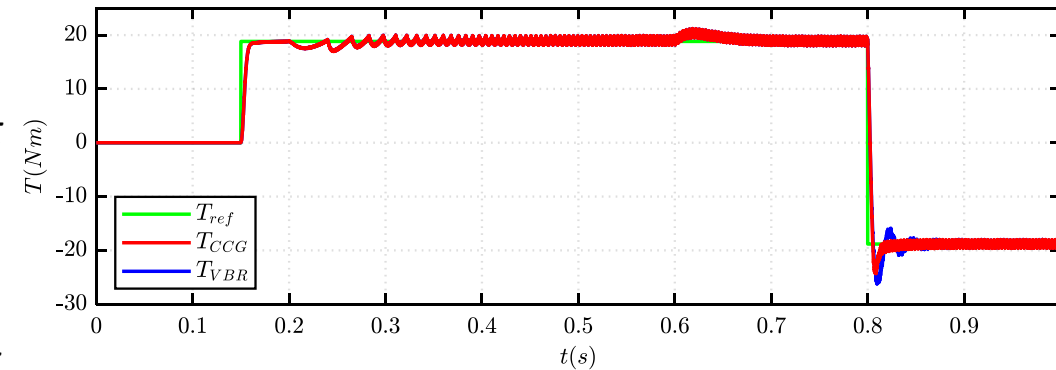
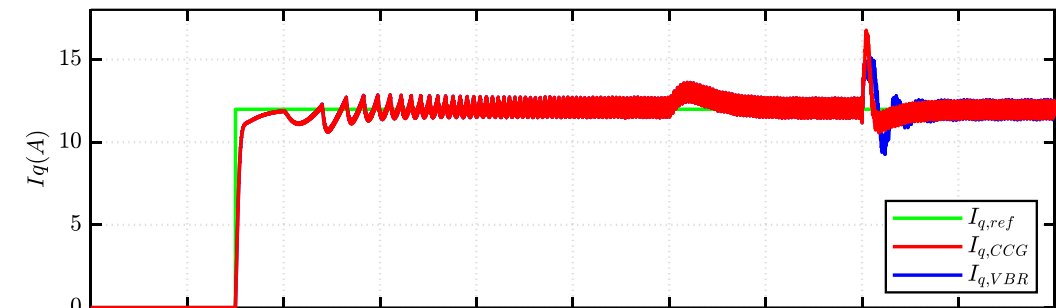
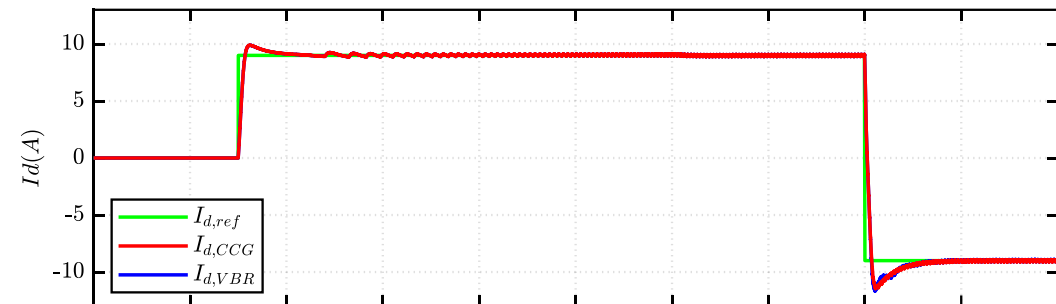
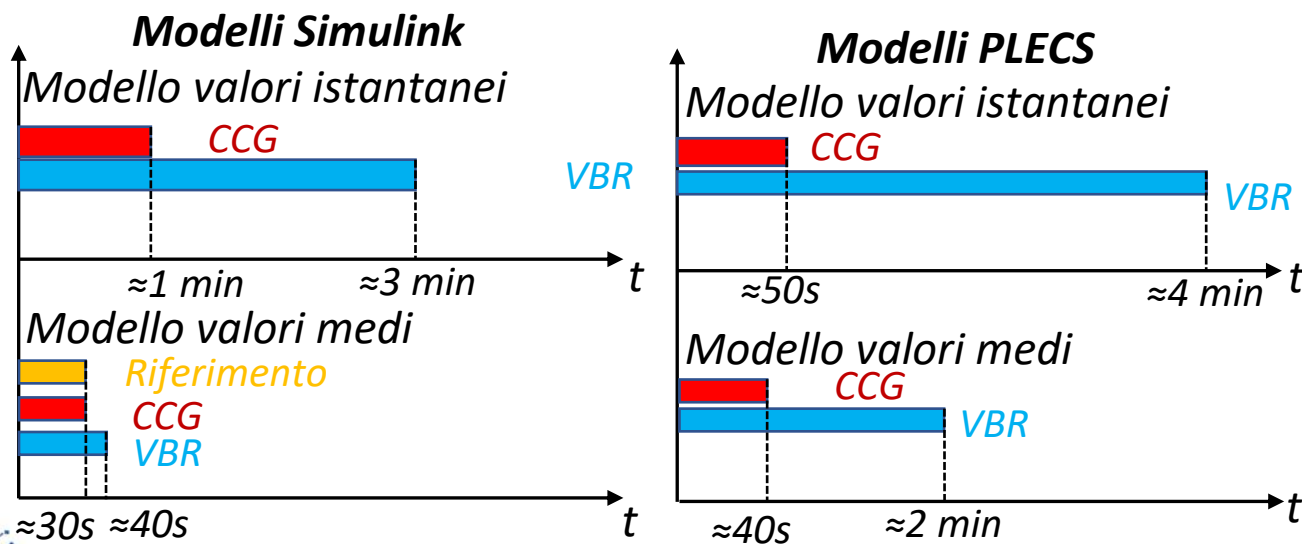
- Implementazione del modello CCG in PLECS e Simulink, usando la libreria Simscape Elettrical



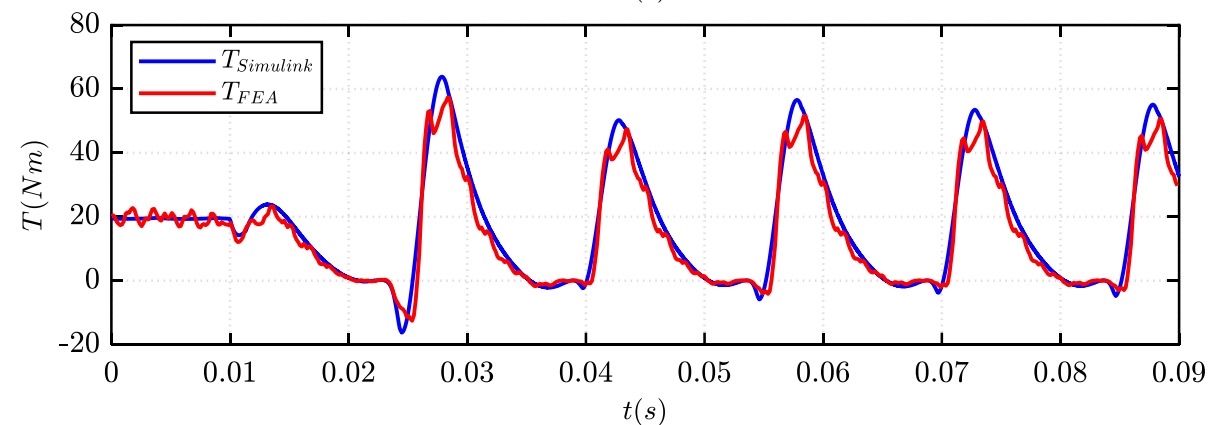
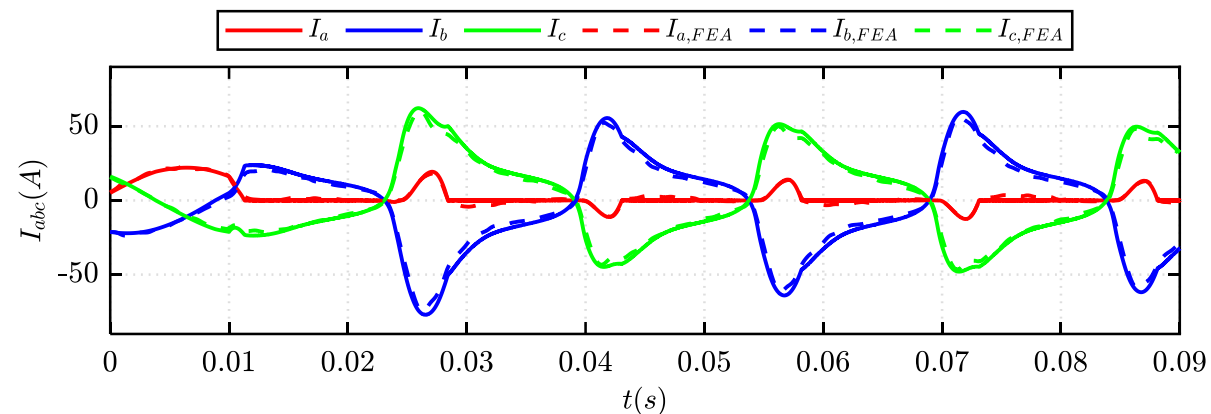
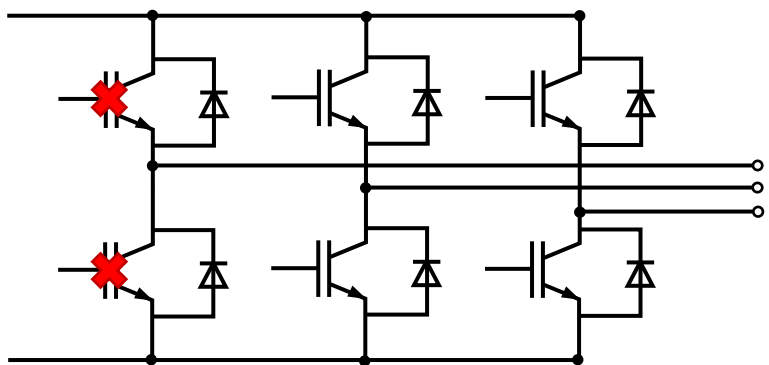
- Implementazione del modello VBR in PLECS e Simulink, usando Simscape Electrical
 - In Simscape, il componente degli induttori accoppiati è stato sviluppato ad hoc



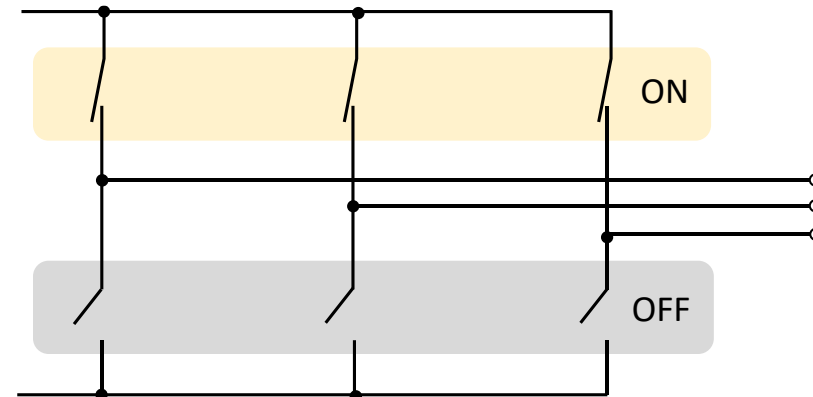
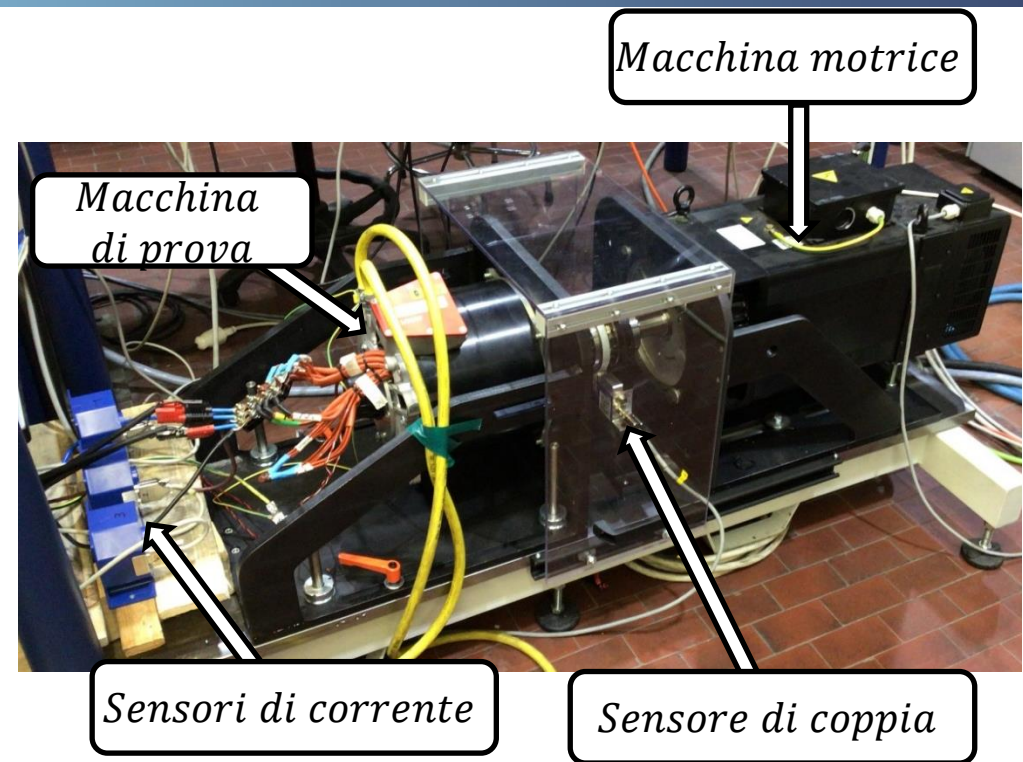
- Controllo di coppia
 - I due modelli forniscono forme d'onda equivalenti in entrambi gli ambienti
 - Andamenti di corrente i_{dq} e coppia simili a regime ma diversi in transitorio
- Comparazione **tempi di esecuzione** per 1s di simulazione
 - Modello VBR più lento del CCG
 - Modello CCG comparabile con il riferimento



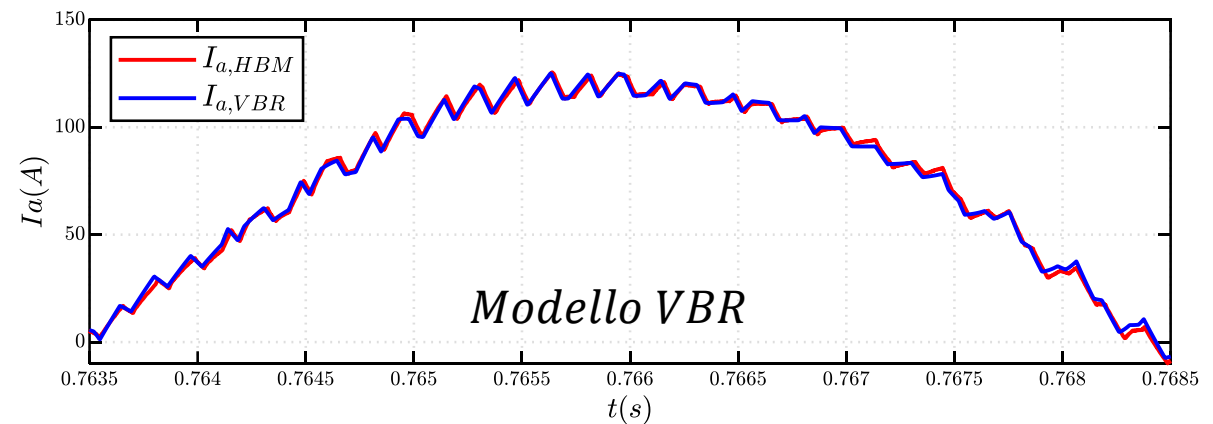
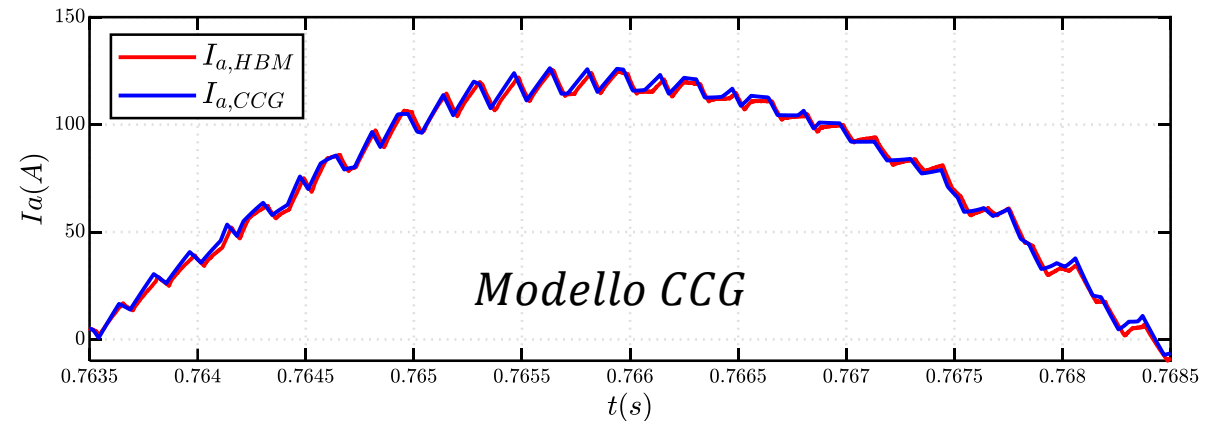
- Simulazione del guasto di apertura di una fase in Simulink e Infolytica-Magnet, programma per analisi FEA
- Le correnti fornite da Simulink da Magnet sono simili
- I modelli CCG e VBR forniscono forme d'onda equivalenti
- Coppie diverse poiché il modello Simulink non tiene conto dell'influenza delle cave



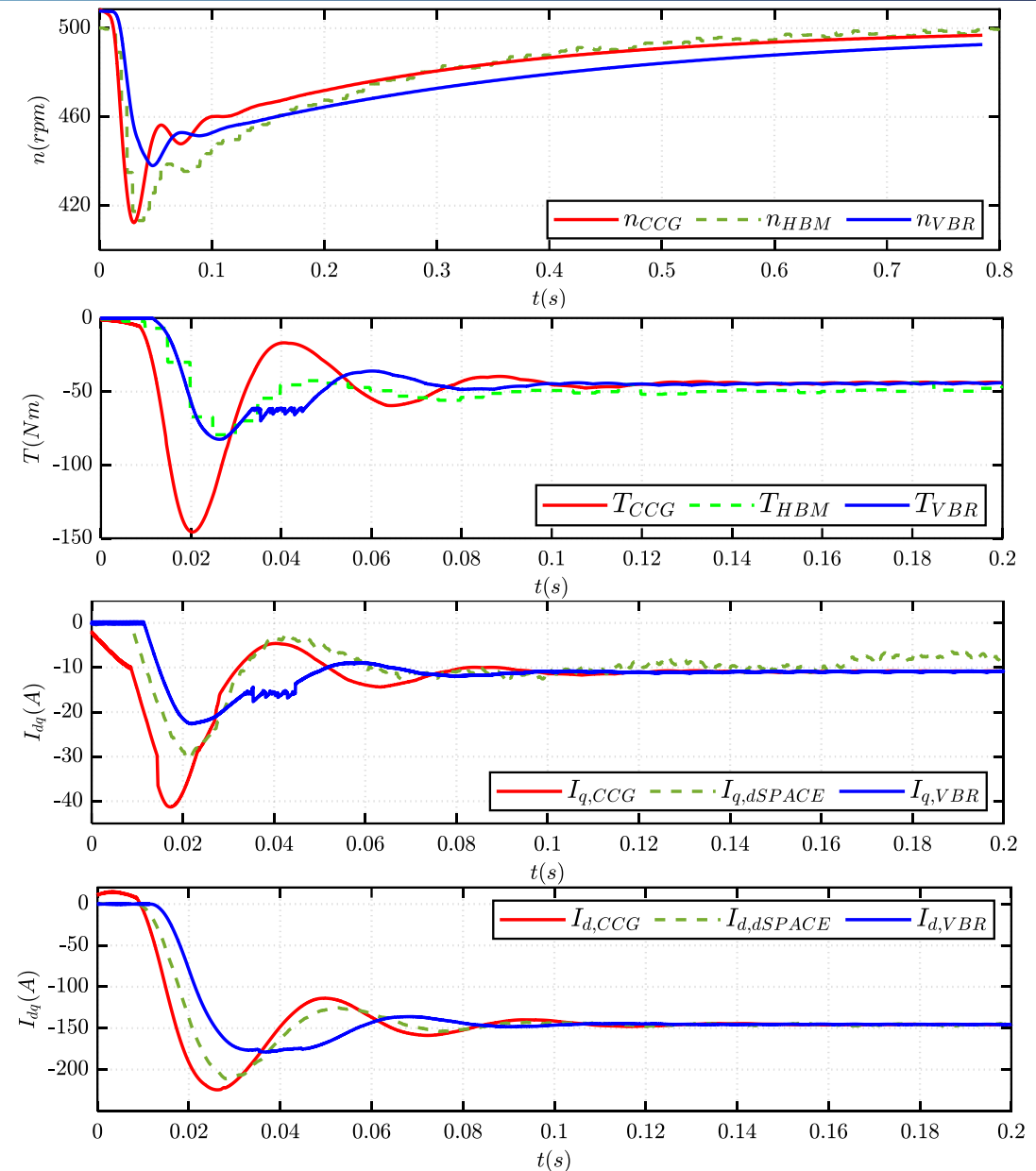
- Macchina di prova: motore a magneti permanenti interni, controllato in corrente
 - Dati di targa: 130Nm, 70kW, 6 poli
- Macchina motrice: motore asincrono, controllato in velocità
- Controllo eseguito su dSPACE MicroLabBox
- Dati misurati con HBM data recorder
 - Misura velocità, coppia e correnti di fase
- Test eseguiti:
 - Misura correnti di fase per l'analisi del ripple PWM di corrente
 - **Active Short Circuit (ASC)** = chiusura degli interruttori alti delle gambe di inverter



- Comparazione del ripple PWM della corrente di fase misurata e simulata
- Punto di lavoro: 2000rpm e coppia nominale
- Entrambi i modelli simulano la corrente di fase in maniera accurata



- Condizione iniziale: 500 rpm e $i_{dq,ref} = 0A$
- Incertezze della simulazione:
 - Non perfetta implementazione dell'anello di velocità della macchina motrice
 - Il punto di lavoro esce dal dominio delle mappe, perciò entrambi i modelli eseguono l'estrapolazione analitica
- I modelli sono equivalenti a regime, ma molto diversi in transitorio
- Il modello CCG è più accurato nel rappresentare le correnti dq misurate da dSPACE



- Il modello CCG è più veloce ma usa le mappe di flusso inverse
- Il modello VBR usa le mappe di flusso dirette ma è più lento
- I due modelli sono equivalenti a regime
- In transitorio i 2 modelli si comportano in maniera diversa:
 - Durante il ASC il modello CCG rappresenta le correnti dq in maniera più accurata
- Il modello CCG sarà utilizzato come modello istantaneo in SyR-e
- Lavori futuri:
 - Approfondimento della simulazione dei guasti
 - Estensione del modello anche al motore ad induzione e multifase

Grazie per l'attenzione

