

**Borsa di studio attivata ai sensi di quanto disposto dal D.M. n. 1061 del 10/08/2021**

Titolo del progetto: Progettazione multifisica di macchine elettriche sincrone a magneti permanenti a flusso assiale ad elevate densità di potenza e velocità di rotazione

La borsa sarà attivata sul seguente corso di dottorato accreditato per il XXXVII ciclo:  
INGEGNERIA ELETTRICA, DEI MATERIALI E DELLE NANOTECNOLOGIE

Responsabile scientifico: Fabio Giulii Capponi

Area per la quale si presenta la richiesta: GREEN

Numero di mensilità da svolgere in azienda: 6

Numero di mensilità da svolgere all'estero: 12 presso McMaster University, Canada

Azienda: Lucchi R. s.r.l.

Progetto di ricerca:

Questo progetto di ricerca si inquadra nell'ambito in un accordo in fase di finalizzazione per un Joint-PhD Degree in Automotive tra Sapienza Università di Roma e McMaster University (Canada).

Il Cluster 5 del Work Programme 2021-2022 di Horizon Europe (Climate, Energy and Mobility) identifica la sfida relativa a "Clean and competitive solutions for all transport modes", come una delle sei Destinations, grazie alle quali contribuire al raggiungimento degli obiettivi del Green Deal Europeo. In particolare, questa Destination intende affrontare le azioni che possono migliorare il footprint climatico ed ambientale, così come la competitività, di differenti modalità di trasporto. Infatti, il settore del trasporto è responsabile per il 23% delle emissioni di CO<sub>2</sub> e, per il 92% della sua domanda di energia, rimane dipendente dai combustibili fossili. Sebbene si sia verificato un significativo miglioramento negli ultimi decenni, le prospettive di emissione di gas serra non sono in linea con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi a causa della attesa crescita nella domanda di trasporto. Vi è quindi necessità di intensificare le attività di ricerca su tutti i mezzi di trasporto, affinché l'Unione Europea sia in grado di raggiungere i propri obiettivi di zero emissioni nette di gas serra entro il 2050 e di significativa riduzione degli agenti inquinanti nell'aria.

L'impatto atteso per la sopra citata Destination, in linea con il Piano Strategico, è di contribuire ad una mobilità priva di impatti sul clima e sull'ambiente, attraverso soluzioni che coinvolgano tutti i mezzi di trasporto. Allo stesso tempo, si vuole incrementare la competitività globale del settore dei trasporti dell'Unione Europea. Al fine di ottenere gli impatti attesi, le attività di ricerca verranno focalizzate anche sulla trasformazione del trasporto su strada in una mobilità a zero emissioni, assicurando che l'Europa rimanga leader mondiale nella innovazione, nella produzione e nei servizi relativi al trasporto su strada.

La trasformazione verso una mobilità a zero emissioni sta facendo da traino ad una importante crescita del mercato dei veicoli elettrici ed ibridi e, di conseguenza, l'industria del settore automotive richiede ai produttori di macchine elettriche di incrementare sempre di più la densità di potenza, al fine di ottenere powertrain più leggeri, più compatti e più economici. Il risultato è un trend verso la progettazione di macchine elettriche con frequenze di alimentazione fondamentale sempre più elevate (superiori al kHz) e con sempre più intenso utilizzo delle parti attive elettriche e magnetiche.

Sia le perdite nel ferro che quelle in alternata nei conduttori dipendono dal quadrato della frequenza di alimentazione, mentre la relazione tra potenza meccanica e frequenza è puramente lineare. In maniera simile, se si considera – a frequenza fissa – un incremento del punto di lavoro dei materiali magnetici, le perdite nel ferro nuovamente aumentano con il quadrato del valore dell'induzione magnetica, mentre la potenza cresce con legge solo lineare. Il comportamento è identico qualora si provi ad incrementare la densità di corrente nei conduttori. Perciò, sia che si

voglia incrementare la potenza di una macchina a parità di volume, sia che si voglia ridurre la taglia di una macchina mantenendo la stessa potenza, il risultato è sempre che la superficie disponibile per l'estrazione del calore generato dalle perdite si riduce progressivamente fino a livelli che compromettono la fattibilità del progetto.

In sostanza, quindi, la ricerca di elevate densità di potenza porta il progetto delle macchine elettriche in prossimità dei propri limiti fisici e produce l'effetto che i vari domini della progettazione (elettromagnetico, termico e meccanico) diventano strettamente interconnessi.

La procedura attualmente impiegata per la progettazione di macchine elettriche prevede di affrontare per primo il solo problema elettromagnetico; successivamente viene effettuato un controllo dei limiti termici e meccanici. Se i vincoli vengono rispettati, la procedura termina; altrimenti si torna indietro al progetto elettromagnetico. In genere, non sono necessarie più di un paio di iterazioni. Questa procedura, tuttavia, rimane valida solo se i problemi elettromagnetici, termici e meccanici sono essenzialmente disaccoppiati. Invece, nel momento in cui si vuole massimizzare la densità di potenza, esistono solo poche soluzioni possibili che garantiscano le prestazioni richieste ed il rispetto dei vincoli termici e meccanici ha un impatto importante sulla effettiva fattibilità. In questi casi, il progetto di una macchina elettrica diventa un problema multifisico strettamente interconnesso, in cui tutti i domini devono essere affrontati contemporaneamente.

Alcune soluzioni proposte in letteratura propongono di affrontare il problema tramite separate simulazioni agli elementi finiti (una per ogni dominio), da far girare con la supervisione di un algoritmo di ottimizzazione. Finora, questo approccio ha prodotto risultati soddisfacenti, al prezzo tuttavia di un notevolissimo costo computazionale. Tuttavia, man mano che l'insieme delle possibili soluzioni si riduce, tale metodologia si può rivelare estremamente inefficace. Infatti, a causa dell'elevato livello di automatizzazione, il processo rischia di non essere in grado di rilevare eventuali inconsistenze e pertanto una tale imponente potenza computazionale verrebbe utilizzata per produrre un risultato "unfeasible" o comunque non realizzabile.

Al fine di trovare una soluzione ai problemi precedentemente evidenziati, questo progetto di ricerca si propone di sviluppare un nuovo e alternativo approccio alla progettazione multifisica, con l'obiettivo di definire nuove procedure analitiche capaci di dare risposte al problema multifisico nel suo insieme in maniera efficiente ed accurata.

Pertanto, in questo progetto si propone l'impiego del concetto di "Actual Design Space" (ADS), cioè lo spazio di progetto entro cui deve essere contenuto il progetto finale. Piuttosto che cercare di arrivare direttamente alla soluzione di progetto, l'idea è quella di definire preliminarmente un intorno della soluzione, chiamato appunto Actual Design Space. Il termine "Design Space" indica lo spazio all'interno del quale il progettista si può muovere per il proprio design. L'aggettivo "Actual" indica il sottoinsieme del Design Space che contiene solo le macchine che effettivamente soddisfano tutti i vincoli di progetto (ad esempio la massima temperatura) e tutti i requisiti (per esempio la potenza nominale). Tramite la definizione dell'ADS, si possono ottenere i seguenti vantaggi:

-E' possibile verificare che le specifiche siano consistenti, già dalla fase iniziale del progetto. Ovvero, è possibile verificare che il problema ammetta almeno una soluzione (ADS non vuoto).

-In funzione della dimensione e della forma dell'ADS, il progettista può guadagnare una prospettiva migliore sul problema da risolvere e scegliere l'algoritmo di ottimizzazione più adatto.

Si osserva infine che la creazione dell'ADS è un processo interamente analitico e non iterativo e pertanto ha un costo computazionale decisamente inferiore anche ad una sola simulazione agli elementi finiti.

Per quanto concerne l'applicazione, il progetto di ricerca mira a sviluppare un approccio multifisico, basato sul concetto dell'ADS, finalizzato alla progettazione di Macchine Elettriche Sincrone a Magneti Permanenti a Flusso Assiale (AFPM) per applicazione di trazione su veicoli elettrici ed ibridi. Tale scelta è giustificata dal fatto che tali macchine si sono dimostrate superiori alle corrispondenti configurazioni a flusso radiale nelle applicazioni di trazione, in cui la lunghezza assiale disponibile è estremamente limitata e il numero di coppie polari è elevato.

Un prototipo verrà costruito e testato sperimentalmente su appositi test benches realizzati presso i laboratori di Macchine e Azionamenti Elettrici di Sapienza e del McMaster Automotive Resource Centre (MARC).

## Magnet Synchronous Machines.

Progetto di ricerca (inglese):

This research project is going to be developed within the framework of a Joint-PhD agreement in Automotive that is currently being defined between Sapienza Università di Roma and McMaster University (Canada).

Cluster 5 of the 2021-2022 Horizon Europe Work Programme (Climate, Energy and Mobility) identifies the challenge of "Clean and competitive solutions for all transport modes" as one of its six Destinations that are expected to contribute to the objectives of the European Green Deal. This Destination addresses activities that improve the climate and environmental footprint, as well as competitiveness, of different transport modes.

The transport sector is responsible for 23% of CO<sub>2</sub> emissions and remains dependent on oil for 92% of its energy demand. While there has been significant technological progress over past decades, projected GHG emissions are not in line with the objectives of the Paris Agreement due to the expected increase in transport demand. Intensified research and innovation activities are therefore needed, across all transport modes and in line with societal needs and preferences, in order for the EU to reach its policy goals towards a net-zero greenhouse gas emissions by 2050 and to reduce significantly air pollutants.

The expected impact of this Destination, in line with the Strategic Plan, is to contribute "Towards climate-neutral and environmental friendly mobility through clean solutions across all transport modes while increasing global competitiveness of the EU transport sector". In order to deliver this impact, research actions will be focused (among others) on transforming road transport to zero-emission mobility, ensuring that Europe remains world leader in innovation, production and services in relation to road transport.

The transformation towards zero tailpipe emission road mobility is driving the growth of the electric and hybrid traction market and, as a consequence, the automotive industry is asking electric machines manufacturers to ever increase the power density, in order to have lightweight, more compact and less expensive powertrains. As a result, there is an increasing trend towards designing electrical machines for higher fundamental frequencies (that can reach above 1 kHz) and higher electric and magnetic loadings.

Both iron and AC copper losses are proportional to the fundamental frequency square, whilst the relationship between the mechanical power and the fundamental frequency is just linear. In a similar way, when magnetic loading is considered at a given frequency, iron losses are approximately proportional to the square of the induction level, while the power rises only linearly. Same behavior is observed when the current density is increased. Therefore, whether the need is to increase the power of the machine keeping the same size, or the goal is to reduce the machine's size at the same power, the result is that the surface available to extract losses becomes less and less.

The drive for higher power density, with the machine performances approaching their limits, produces the effect that the electromagnetic, thermal and mechanical designs are becoming tightly interconnected.

The current design procedure for electric machines starts from the electromagnetic design alone, followed by a check on thermal constraints and on the mechanical ones. If those are met, the procedure ends, otherwise the procedure iterates back to the electromagnetic design. No more than a couple of iterations are usually needed. This procedure, however, is suitable only if the electromagnetic, thermal and mechanical problems are essentially decoupled. Instead, when trying to maximize power density, there are only few possible solutions that meet both the required performance and the actual limitations, with the thermal and mechanical constraints playing a big role in the overall feasibility of the design. In this cases, the electric machine design becomes a tight multiphysics problem, where the all the aspects need to be addressed together.

Some research is already tackling the multiphysics design problem, addressing it as separate FE models (one per 'physics') run under the 'supervision' of an optimization algorithm. This approach relies on a strongly automated process based on several FE models, usually driven by an optimization algorithm. So far, the methodology proved to achieve satisfying results, even though at the price of a high computational power. On the other hand, as the set of potential solutions grows narrower, such methodology might become highly ineffective. Due to the high level of automation, the process is not capable of detecting any unforeseen inconsistency and therefore, the huge computational power would be spent to produce an unfeasible or unrealizable final design.

In order to overcome the issues discussed above, this project proposes the development of a novel, alternative approach to the multiphysics design, aiming at the definition of new analytic design procedures, capable of addressing the multiphysics problem in an efficient and accurate way.

To this end, this project proposes the concept of 'Actual Design Space' (ADS), i.e. the 'space' wherein the final design will be found. Rather than 'jumping' to the final solution, the idea is to previously define a specific 'neighbourhood' around the final solution named Actual Design Space. Following from the description of the multiphysics design given above, the 'set of configurations where the volume available is optimally shared between the active and the 'cooling' parts', is indeed the ADS itself. The term 'Design Space' indicates the space wherein the designer shall move to achieve the final solution. The adjective Actual denotes that it comprises only of machines that satisfy all the design constraints, e.g. maximum temperatures, and requirements, e.g. rated power. This property of the ADS allows for the following advantages:

- Possibility to verify if the specifications are consistent, even from the initial design stage. In other terms, it is possible to verify that the design is feasible (ADS not empty).

- According to the size and the 'shape' of the ADS, the designer can get a better insight of the design problem and select the best solution/optimization algorithm.

Finally, it is observed that the creation of the ADS is an entirely analytical, non-iterative process, as that its computational cost is negligible compared to even one FE iteration.

In terms of applications, the proposed research aim to develop and apply the ADS-based multiphysics design approach to the design of an Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Synchronous Machine for traction applications. The reason for this choice is given by the fact that AFPM machines have been proven to be superior to their radial counterpart in traction applications, where the axial length is very short and the pole number is high.

A prototype will be built and tested on dedicated test benches developed in the Electrical Machines and Drives Labs of Sapienza and of McMaster Automotive Resource Centre (MARC).