

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

Titolo del progetto: Inverter trifase a tensione impressa basato su dispositivi wide-bandgap per la conversione elettromeccanica dell'energia ad alta frequenza nei veicoli elettrici ed ibridi di nuova generazione.

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

Responsabile scientifico: Giulio De Donato

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).

La prima priorità individuata dalla Commissione Europea nell'ambito della "Energy Union and Climate Action" è indicata con "Driving clean mobility". La Commissione ha recentemente pubblicato due pacchetti di azioni sul tema della "Clean Mobility", relativi al trasporto su strada: "Europe on the move" (proposal for a clean, competitive and connected mobility) e "Driving clean mobility" (proposal to reinforce EU's global leadership in clean vehicles). In entrambe le proposte, la Commissione indica la riduzione nelle emissioni di CO<sub>2</sub> come l'azione principale da perseguire, definendo l'obiettivo, per i nuovi veicoli, di un decremento delle emissioni medie di CO<sub>2</sub> del 30% nel 2030, in confronto ai valori del 2021. Gli obiettivi per il 2030, sono pensati non solo per garantire la disponibilità di veicoli più puliti, ma anche per dare stabilità ed un indirizzo a lungo termine agli investimenti dei produttori, dal momento che le nuove norme sulle emissioni di CO<sub>2</sub> avranno un impatto significativo sulle spese in ricerca e sviluppo dei produttori europei di autoveicoli. A questo scopo, il Work Programme di Horizon 2021-22 (come già Horizon 2020) prevede diverse call legate alla mobilità elettrica, concentrandosi sui cosiddetti Light duty vehicles (LDVs), in quanto tale categoria di veicoli è attualmente responsabile di circa il 15% del totale delle emissioni di CO<sub>2</sub> della EU.

Alla luce delle precedenti considerazioni, è evidente che l'ottenimento di alte velocità di rotazione è l'elemento chiave per consentire elevate densità di potenza nella prossima generazione di powertrain per LDV. L'idea alla base è piuttosto semplice: per una data potenza, il volume della macchina elettrica si riduce, insieme alla coppia, all'aumentare della velocità di rotazione. Inevitabilmente, però, alte velocità conducono ad altrettanto elevate frequenze di alimentazione e, di conseguenza, a frequenze di modulazione ancora più alte, fino a raggiungere e superare i 100kHz. Tali frequenze di modulazione, insieme a tensioni di alimentazione di diverse centinaia di volt, non possono essere ottenute con semiconduttori al silicio. Tali dispositivi dovranno perciò essere sostituiti con semiconduttori a banda larga, quali il Carburo di Silicio (SiC) ed il Nitrato di Gallio (GaN). Perciò, gli inverter trifase a tensione impressa, basati su dispositivi a semiconduttore a banda larga, sono una delle tecnologie abilitanti per l'effettivo sviluppo della nuova generazione di powertrain per LDV.

Obiettivo del progetto di ricerca è pertanto la progettazione, lo sviluppo e la sperimentazione di un inverter trifase a tensione impressa ad elevata frequenza di modulazione, per la conversione elettromeccanica dell'energia ad elevata frequenza fondamentale di alimentazione.

Considerando le esistenti tecnologie di transistor basati su semiconduttori a banda larga, è largamente riconosciuto in letteratura il fatto che i transistor GaN High Electron Mobility (HEMTs) consentano di ottenere prestazioni migliori

rispetto a MOSFET basati su SiC per tensioni al di sotto del kV, quali quelle di interesse nel settore della trazione elettrica, dovuta essenzialmente alla minore resistenza offerta. Pertanto, la ricerca verrà focalizzata sugli inverter trifase a tensione impressa basati su GaN HEMTs. Sebbene tale idea sia già stata presentata in letteratura, inverter trifase basati su dispositivi GaN non sono ancora disponibili sul mercato ed è ancor necessario condurre approfondite ricerche per comprendere appieno i benefici ed i limiti nell'impiego di convertitori che modulano a frequenze così elevate per alimentare motori elettrici.

Tra gli aspetti chiave che necessitano di ulteriori investigazioni vi è sicuramente l'effetto degli elevati  $dV/dt$  dovuti alla commutazione sui cavi, sull'avvolgimento della macchina elettrica e sull'inverter stesso. I dispositivi GaN sono in grado di commutare con velocità dell'ordine di 50 V/ns e, a tali velocità, i cavi di alimentazione si comportano come delle "transmission lines" e l'onda di tensione che si ottiene viene riflessa ripetutamente lungo il cavo, causando sovratensioni che possono arrivare a 4 volte il valore della tensione del DC link, le quali a loro volta possono portare alla rottura dei semiconduttori. In ogni caso, i fenomeni di oscillazione innescati dalle "travelling waves" della tensione comportano un aumento significativo delle perdite di commutazione, le quali possono essere una ulteriore sorgente di guasto nell'inverter.

Gli effetti sopra descritti possono essere fortemente ridotti tramite l'impiego di un filtro di potenza all'uscita dell'inverter. Tale soluzione, generalmente, non viene adottata negli azionamenti commerciali basati su dispositivi al Silicio, dal momento che i componenti passivi (capacitori e induttori) sono costosi, ingombranti e pesanti. Tuttavia, dal momento che l'adozione di GaN HEMTs consente l'aumento della frequenza di modulazione di almeno un ordine di grandezza, in questo caso la taglia ed il peso dei componenti passivi viene ridotto notevolmente. Perciò un ulteriore importante aspetto di questa ricerca è la progettazione del filtro di potenza in uscita e della sua integrazione nell'azionamento.

Il progetto dell'inverter e del filtro dovranno essere verificati tramite opportune simulazioni. Quando la progettazione sarà finalizzata, si avvierà la costruzione del convertitore e la realizzazione delle relative schede. In ultimo, l'intero azionamento basato sull'inverter trifase a tensione impressa con dispositivi GaN HEMTs verrà testato sperimentalmente su appositi test benches realizzati presso i laboratori di Macchine e Azionamenti Elettrici di Sapienza e del McMaster Automotive Resource Centre (MARC).

Titolo del progetto (inglese): Wide-bandgap-semiconductor-based, three-phase voltage source inverter for high-frequency electromechanical energy conversion in next generation hybrid vehicles

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).

Among the "Energy union and climate" priorities to bring about the transition to a low-carbon, secure and competitive economy, the European Commission has indicated 'Driving clean mobility' as the first action. The Commission recently issued two "Clean Mobility packages" related to road transportation: "Europe on the move" (proposal for a clean, competitive and connected mobility) and "Driving clean mobility" (proposal to reinforce EU's global leadership in clean vehicles). In both the proposals, the Commission indicates the reduction in CO<sub>2</sub>-emissions as the main action to be pursued, issuing the challenge that, both for new cars and vans, the average CO<sub>2</sub> emissions will have to be 30% lower in 2030, compared to 2021. The 2030 targets are not only thought to supply cleaner vehicles, but also to give stability and long-term direction for the investments of the manufacturers, as the new CO<sub>2</sub> standards are going to have a significant impact on the R&D expenditures of European vehicle manufacturers. To this end, the EU is continually funding clean transportation calls within the H2020 framework program.

In the latest "Green Mobility" package, the EU is looking at new passenger cars and vans (i.e. the Light duty vehicles - LDVs) to accelerate the transition to low emission vehicles, since these are responsible for around 15% of the total EU CO<sub>2</sub>-emissions.

In light of the above considerations, it is recognised that high rotational speeds are the key to high power density in

next generation LDV powertrains. The basic idea is relatively simple: for a given power, the electric machine volume becomes smaller as the rotational speed increases. High speeds invariably lead to high electrical supply frequencies and, consequently, ultrahigh switching frequencies, i.e. greater than 100 kHz. To achieve such switching frequencies at voltages above a few hundred volts, it is well known that silicon must be replaced by wide-bandgap-semiconductors such as silicon carbide (SiC) or gallium nitride (GaN). Thus, wide-bandgap-semiconductor-based, three-phase voltage source inverters will constitute one of the enabling technologies for successful development of next-gen LDVs.

The objective of the project is to design, build and test a high switching frequency, three-phase voltage source inverter for high frequency electromechanical energy conversion.

Among possible wide-bandgap semiconductor transistor technologies, it is widely accepted in literature that GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) have an advantage over SiC MOSFETs in the sub 1kV voltage range, which is of interest for electrical traction. The reason for this lies in the significantly lower channel resistance of the former devices compared to the latter. Thus, GaN HEMTs in a three-phase voltage source inverter structure will be investigated. This idea has been recently reported in the literature, however no commercial GaN-based three-phase inverters are available yet and a significant amount of research still needs to be performed to fully understand the benefits and underlying limitations of using such high switching frequency converters to drive electric motors.

Among the key aspects which haven't been fully investigated in the literature are the effects of the high  $dV/dt$  caused by the switching on the cables, on the motor windings and on the inverter itself. GaN switches are able to commute with voltage slew rates in the range of 50 V/ns. When such fast voltage transients are applied to three-phase motors fed by cables, these exhibit transmission line characteristics and the travelling voltage waves reflecting back and forth along the cables can sum up and cause overvoltages up to 4 times the dc bus voltage. This will cause transistor failures if appropriate measures aren't taken. Finally, increased switching losses with respect to the standard data obtained from double pulse tests can be expected due to the ringing caused by the capacitive parasitic coupling due to the cables and the motor windings.

The above described effects can be reduced by using an output power filter. Output filters are generally not used in commercial drives, due to the fact that the required capacitors and inductors (i.e. passives) are bulky and heavy; however, since the switching frequencies can be increased by more than an order of magnitude by using GaN HEMTs, the size and weight of the passives will be strongly reduced. Thus, another important aspect of this project is the design of the output power filter and its integration in the drive.

The design of the inverter and the filter will be verified via simulation. Once the design is finalised, the circuit boards will be fabricated externally. Finally, the entire drive system will be tested on dedicated test benches developed in the Electrical Machines and Drives Labs of Sapienza and of McMaster Automotive Resource Centre (MARC).