

# Development of an innovative wind generator prototype

In the last decade the wind energy sector has experienced steady growth (Fig.1), and the installed power and related investments are essentially increasing notwithstanding the global financial crisis. In particular, the global wind energy market represented a 45 Bn€ per year turnover in 2009, with an increasing contribution from Asian countries according to Market Forecast 2010-14 by the GWEC 2010. That same report indicated that offshore installations cover 2.8% of wind energy production, with a projection for offshore installations expected to exceed 17% by 2020 (Source: Pure Power, EWEA 2009).

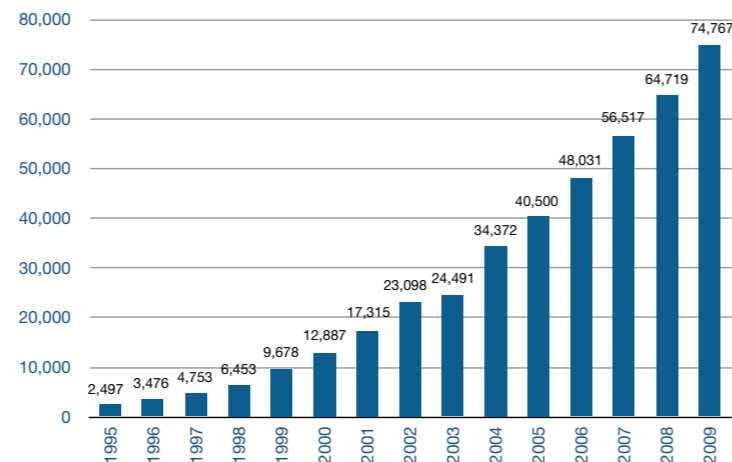


Fig 1. Cumulative wind power installed in the EU, MW (Wind in Power, EWEA 2010)  
Fig 1. Potenza eolica cumulativa installata in UE, MW (Vento in Potenza, EWEA 2010)

After Germany and Spain, France, Italy, the UK and Portugal are considered a second wave of stable markets which should close 2010 with a 42% share of new EU wind power installed capacity (Fig.2).

This market is strongly correlated to available technology: the market share among the principal players is reported in Fig.3, each player adopting his own proprietary electromechanical conversion technology.

It is worth underlining that there are a number of different technical solutions presently adopted for wind energy production.

Skipping the details, the statistically prevailing solution is based on fast, doubly-fed induction generators with gear-

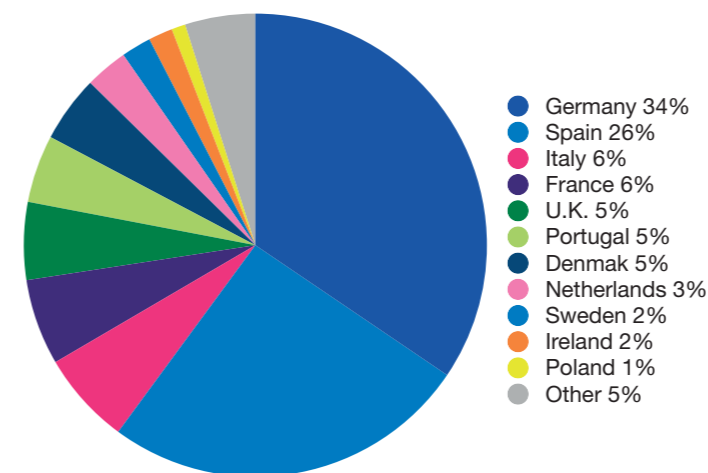


Fig 2. EU wind power share for installed capacity (2009)  
Fig 2. Suddivisione della Potenza eolica in UE in funzione della capacità installata (2009)

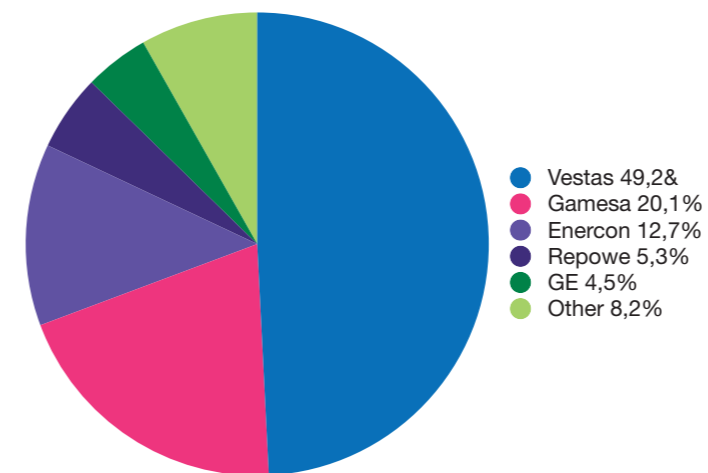


Fig 3. Italian market share (2007)  
Fig 3. Suddivisione del mercato italiano (2007)

boxes: thanks to a long-standing worldwide policy of market competition and cost reduction on these comparatively simple electromechanical devices, such systems are now characterised by the lowest installation costs (the average turnkey investment in 2007 was 1.23 M€ / MW and today is targeting 1M€ / MW).

On the other hand this solution is not completely immune from major drawbacks, including the intrinsic need of a multi-stage multiplication gearbox, limited operation flexibility and some restrictions related to grid dynamic behaviour (flicker, voltage dip ride-through response).

So, although the majority of the installations to date have been based on these popular doubly-fed induction generators, the increasing connection of wind farms to power grids (7% coming from wind in 2005, targeting 12% in 2020) have evidenced stability and power quality issues that are heavily impacted by such low cost solutions. Re-

## Sviluppo di un prototipo innovativo di generatore eolico

Nell'ultimo decennio il settore dell'energia eolica, nonostante la crisi finanziaria globale, è cresciuto in maniera costante (Fig.1); ne sono prova evidente l'aumento della potenza installata ed i relativi investimenti. In particolare, secondo le previsioni di mercato 2010-2014 indicate nel rapporto GWEC 2010, il mercato globale dell'energia eolica ha raggiunto un fatturato annuale di 45 miliardi di Euro nel 2009, con un crescente contributo da parte dei paesi Asiatici.

Quello stesso rapporto ha inoltre evidenziato che le installazioni offshore coprono il 2,8% della produzione di energia eolica, con una proiezione attesa per le installazioni offshore di oltre il 17% dal 2020 (fonte: Pure Power, EWEA 2009).

Dopo Germania e Spagna, anche Francia, Italia, Regno Unito e Portogallo sono considerati nuove aree dove poter far crescere mercati stabili. Questi paesi, infatti, dovrebbero chiudere il 2010 con una quota pari al 42% della nuova capacità di potenza eolica installata in UE (Fig.2). Questo mercato è rigidamente correlato alla tecnologia disponibile: la suddivisione del mercato tra i principali paesi in gioco è riportata in Fig.3, considerando che ciascuno di questi adotta la propria tecnologia di conversione elettromeccanica.

Vale la pena sottolineare che, attualmente, ci sono differenti soluzioni tecniche adottate per la produzione di energia eolica. Tralasciando i dettagli, la soluzione statisticamente più utilizzata si basa su generatori ad induzione a doppia alimentazione con moltiplicatore di giri.

Grazie ad una stabile politica mondiale di concorrenza e di riduzione dei costi su questi componenti elettromeccanici relativamente semplici, tali sistemi sono attualmente caratterizzati dai più bassi costi di installazione (l'investimento medio per un chiavi in mano nel 2007 era 1,23M€/MW e l'obiettivo di oggi è 1M€/MW).

D'altra parte, questa soluzione non è completamente immune da importanti svantaggi, quali il bisogno intrinseco di un moltiplicatore di giri multistadio, limitata flessibilità operativa ed alcune restrizioni relative al comportamento dinamico in rete (risposta a buchi di tensione).

Quindi, sebbene, fino ad ora la maggior parte delle installazioni si siano basate su questi generatori ad induzione a doppia alimentazione, l'incremento delle connessioni di centrali eoliche alla rete elettrica (7% proveniente dal vento nel 2005 con obiettivo del 12% nel 2020) ha evidenziato problemi di stabilità e qualità dell'energia, che subiscono il pesante impatto di queste soluzioni a basso costo.

Regolamenti internazionali di recente diffusione hanno sottolineato quali siano le esigenze attuali e future affinché i sistemi di generazione distribuita possano dimostrare controllabilità, flessibilità e adeguate caratteristiche di qualità dell'energia.



cent international regulations underline present and future needs for distributed generating systems to exhibit improved control, flexibility and power quality characteristics.

It is a fact that practically every major player on the market has already developed (or is developing) a permanent-magnet-generator-based conversion system, using high, low or medium speed according to their proprietary mechanical philosophy. This switch in technology is changing the shape of the market and opening the door to an application where Ansaldo Sistemi Industriali can add real value.

Permanent magnet equipment in the MW range is a relatively recent technology: showing superior characteristics, it introduces new or enhanced features which promise to solve the present system limits. The design flexibility of permanent magnet machines and their naturally higher efficiency (rotor losses are negligible) fits the special application of wind energy conversion very well. This is true regardless of whether the generator nominal speed is high (~1500rpm), medium (~150rpm, so called "hybrid drive") or very low (~15rpm "direct drive").

Since the PM machine a synchronous machine, a full-sized AC-DC-AC converter is always necessary for operation; the benefit being that with this converter the conversion system permits a wider operating range and the best efficiency also at partial load operation.

One of the most technically challenging applications is the direct-drive configuration, which is based on the adoption of a generator directly connected to the wind turbine rotor, eliminating gear boxes with their related drawbacks. Since limited historic data is available, the constraints and benefits of this technology are still a subject of discussion. In particular, the applicability of this solution for off-shore plants is controversially considered: turnkey costs are estimated to be from 1.2 up to 2 M€/MW (Junginger 2005, ECN 2004).

For such systems, even using permanent magnet technology, comparatively large electric machines are needed, to manage the enormous torque amounts (in the order of thousands of kNm at peak speed as low as 13 rpm). These machines are characterised by an extremely high number of poles (80÷200) thus they cannot be easily supplied with traditional induction or wound synchronous technologies. Producers of these wind turbines must carefully evaluate the trade-off between heavier, bulkier size and weight against higher reliability.

When Ansaldo Sistemi Industriali first approached the development of their high polarity permanent magnet machine we were interested in the solution not only for wind farms but also for direct marine propulsion applications which have similar requirements, and, in our opinion, shipbuilders are slowly but steadily starting to take an interest in this solution as an improved alternative to standard "rigid" propulsion solutions.

Several of our main competitors had already launched high polarity PM machines on the market but we were convinced there was still space for improvement. When we started our research project our principal goal was to understand the full potential and limits of this technology, in particular based on the much trendy "wound tooth" air cooled stator configuration (a solution ASI had no experience with). We also wished to manufacture a prototype incorporating features that we believed added market value for our customers' applications. In both wind and marine applications, efficiency and reliability are very important. In offshore wind for example it is evident the huge impact on costs of both energy production downtime and repair activities that can be aggravated by the relative insurance costs (some downtimes statistics are reported in Fig.4). Our prototype had to address these issues and undergo a full test campaign to demonstrate performance. Since we wanted to achieve aggressive cost and delivery time targets as well as performance we needed to conduct the project with a transversal team using Lean Manufacturing techniques.

The new concept we introduced is rotor and stator modularity, allowing a quasi-fault-tolerant construc-

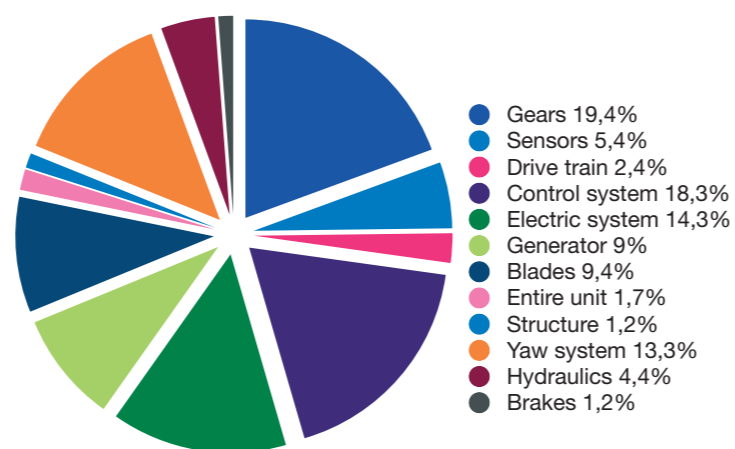


Fig 4. Percentage of downtime per component in Sweden in 2000-2004 (J.Ribrant et. Al, IEEE Transactions on Energy Conversion, March 2007)  
Fig 4. Percentuale di inattività per componente in Svezia nel 2000-2004 (J.Ribrant et. Al, IEEE Transazioni sulla Conversione di Energia, Marzo 2007).

tion: this system has no gears and when a stator failure happens (for example induced by a lightning strike), servicing by a single operator allows quick production restart with reduced power. In this way the gears and generator downtimes shown in Fig.4 is practically reduced to zero, improving the availability by 28% in comparison to a doubly fed induction system.

In this partial power condition the system can run indefinitely: later (when convenient) the replacement of the damaged sector can be performed with extremely limited logistic requirements, impact on the production, tooling and parts needs. Specifically, the stator can be serviced without extracting the entire rotor. These advantages are even more attractive for off-shore applications due to operating costs and plant access availability (lower accessibility due to stormy weather and/or limited means of transportation).

We selected a radial IPM wound tooth configuration: theoretically, with natural air cooling, this solution grants smooth rotation at such a low speed (low ripple torque) and the higher possible polarity (allowing a lower mass and lower additional costs). Ripple torque control is a fundamental aspect since there is no gearbox and every torque pulsation represents direct fatigue stress component on the composite turbine blades, affecting the durable life cycle of both the blades and other parts.

Shortly into the project we realized that a totally new calculation approach was needed if we wanted to match optimized electromagnetic performance with our other design targets. Thus we developed a hybrid FE-analytical software tool enabling us to determine the expected -and fearsome- magnetic field sub-harmonics eddy current effects on the rotating parts. Then we launched a comprehensive calculation campaign to identify the pole-tooth combinations which best promised to minimize these effects (the so called "magic couples search"). Finally, we looked into the magic couples best fitting our final design target and started designing the machine details from there using traditional FE methods.

Our manufacturing team found itself actively involved in the design process since we wanted to identify a solution that could be manufactured in high quantities like a standard off-the-shelf item with the lowest possible manufacturing lead time and cost. The biggest challenge was identifying an inexpensive method of forming the AC wound coils, and to manage the unknown sector assembly and other huge parts dimensional tolerances within comparatively strict constraints.

The workshop thus conducted a series of test activities to provide critical indications on the construction alternatives

*È provato che praticamente ogni principale attore sul mercato ha già sviluppato (o sta sviluppando) un sistema di conversione basato su generatore a magneti permanenti, ad alta, media o bassa velocità secondo la propria filosofia meccanica. Questo rinnovamento tecnologico sta cambiando la struttura del mercato e sta aprendo la porta ad una applicazione dove Ansaldo Sistemi Industriali può aggiungere un valore reale.*

*Le applicazioni delle macchine a magneti permanente nel campo di potenze dei MW rivela una tecnologia relativamente recente. Sono dimostrate non solo caratteristiche superiori, ma anche l'introduzione di funzioni nuove o migliorate che promettono di risolvere gli attuali limiti di sistema. La flessibilità di progetto delle macchine a magneti permanenti e la loro efficienza palesemente più elevata (perdite rotoriche trascurabili) si adatta molto bene alla speciale applicazione della conversione di energia eolica. Questo è vero indipendentemente che la velocità nominale del generatore sia alta (~1500 giri/min), media (~150 giri/min, "trasmissione ibrida") o molto bassa (~15 giri/min, "trasmissione diretta").*

*Dal momento che la macchina a MP è una macchina sincrona, è sempre necessario per il suo funzionamento utilizzare un convertitore CA-CC-CA a piena potenza. Di conseguenza il sistema di conversione permette di sfruttare l'intero campo di velocità disponibile e di raggiungere la migliore efficienza anche a carico parziale.*

*Una delle applicazioni tecnicamente più problematiche è la configurazione a trasmissione diretta, la quale è basata sull'adozione di un generatore direttamente connesso al rotore della turbina eolica, eliminando i riduttori ed i relativi inconvenienti. Dal momento che sono disponibili limitati dati storici, i vincoli ed i benefici di questa tecnologia sono tutt'ora oggetto di discussione. In particolare l'applicabilità di questa soluzione per impianti off-shore è considerata in maniera controversa; si stima che i costi per un prodotto chiavi in mano vadano da 1,2 fino a 2 M€/MW (Junginger 2005, ECN 2004).*

*Per tali sistemi, anche utilizzando la tecnologia a magneti permanenti, sono necessarie macchine elettriche relativamente grandi per gestire l'enorme coppia della turbina (milioni di Nm a velocità di rotazione bassissime, anche di soli 14 giri/min). Queste macchine sono caratterizzate da un numero di poli estremamente elevato (80÷200), e non possono essere facilmente fornite con tecnologie sincrone o ad induzione tradizionali. I produttori di queste turbine eoliche devono valutare attentamente il compromesso tra avere maggiori ingombri e pesi e una maggiore affidabilità.*

*Quando Ansaldo Sistemi Industriali ha iniziato a studiare lo sviluppo delle macchine a magneti permanenti ad alta polarità, il nostro interesse si è rivolto non solo allo studio delle problematiche dei sistemi eolici, ma anche a quelle delle applicazioni di propulsione navale, che hanno requisiti simili. È nostra opinione che i costruttori navali stiano lentamente ma stabilmente iniziando ad avere interesse in questa soluzione in quanto alternativa migliorativa alle "rigide" soluzioni propulsive standard.*



feasibility operating on cut-and-try samples, supplying valuable feedback on the best effective mounting sequences and on the allowable dimensional tolerances to be achieved.

Both the design team and the manufacturing team found themselves working within an extremely tight timetable to meet project deadlines and budget constraints with outstanding results.

The results of this project were made possible by the joint efforts of the research team and of the senior mechanical designers in the Monfalcone plant; the competencies of our passionate colleagues span the field of mechanics, electromagnetics and fluid dynamics, with strong computer and data analysis capabilities. The development of the software programming and computer calculation took more than 6 months and involved resources both from ASI and the University of Trieste.

On the manufacturing side, important innovations were made possible thanks to the strong dedication of different competencies of the manufacturing and construction technology department. In particular, the coil and sectors forming solutions were identified by a committed team of workers both from the DC and AC motor lines, that provided constructive feedback and the path forward on several open design points.

From mechanical engineering drafting to the finished prototype took about one year; a photo of the prototype construction is reported in Fig.5. The entire project was completed in eighteen months as foreseen. The discussions which took place during the design



Fig 5. Non-magnetized rotor manipulation in the workbench; it is evident the high polarity in comparison to standard synchronous constructions.  
Fig 5. Manipolazione sul banco di lavoro del rotore non magnetizzato; è evidente l'alta polarità in confronto alle soluzioni sincrone tradizionali

phase lead to several other minor new solutions worth noting: the integral laminated backlax pressure plates with the magnetic circuit and the NdFeB magnets with custom corrosion protection. These solutions will certainly be used again in future PM machines.

The choice was to build a full-scale diameter but axially shorter machine than the market target 2MW generator; nevertheless the prototype represents the slowest speed, biggest diameter highest torque machine ever produced at Monfalcone. Turn numbers and insulating system are directly for 3.3kV, even if due to the shorter axial length in the test campaign the prototype is managed with a couple of low-voltage GT3000 (690V) inverters, see Fig.6.



Fig 6. Prototype and converter test lay-out.  
Fig 6. Configurazione del prototipo ed del convertitore

Since the torque values are extremely high, to reach the full load testing an inner back-to-back configuration was set up using two different converters: half of the machine is operated as a motor and the symmetrical remaining side as a generator. In this way, apart from the system losses, the main power flows through a common DC bus. Thus the machine rotates but no additional external load or driving motor are required.

This is the first time that a similar test procedure has been used at the Monfalcone facility. The test campaign was successfully completed in May 2010; main construction data and test results are reported in the table below and confirm the targeted features.

#### Conclusions and future developments

Ansaldo Sistemi Industriali plans to continue testing on the prototype and has already identified important time and cost-cutting simplifications in coil manufac-

*Alcuni nostri concorrenti avevano già lanciato sul mercato le macchine MP ad alta polarità, ma noi eravamo convinti che ci fosse ancora spazio di miglioramento. Quando abbiamo iniziato il progetto di ricerca, il nostro principale obiettivo era di valutare le piene potenzialità ed i limiti della tecnologia basata sulla soluzione con statore "a dente avvolto" raffreddato ad aria (soluzione in cui ASI non aveva esperienza). In particolare desideravamo costruire un prototipo che incorporasse caratteristiche che avrebbero potuto dare un valore aggiunto sul mercato per le applicazioni dei nostri clienti. In entrambe le applicazioni -marina ed eolica- efficienza ed affidabilità sono molto importanti; nelle applicazioni eoliche off-shore, ad esempio, è evidente l'enorme impatto sui costi sia dei periodi di mancata produzione sia delle attività di riparazione, che possono inoltre essere pesantemente aggravate dai relativi costi assicurativi (alcune statistiche di periodi di inattività sono riportate in Fig.4).*

*Il nostro prototipo doveva rispettare questi requisiti ed essere sottoposto ad una campagna di test completa per dimostrare le sue prestazioni. Decidemmo che, se volevamo ottenere prestazioni, costi aggressivi e gli obiettivi dei tempi di consegna avevamo bisogno di gestire il progetto con una squadra trasversale utilizzando tecniche di Lean Manufacturing.*

*Il nuovo concetto introdotto riguarda la modularità rotore e statore che ha permesso una costruzione parzialmente tollerante ai guasti. Questo sistema non possiede ingranaggi e, nel caso di guasto allo statore (indotto ad esempio da una fulminazione), la manutenzione tramite un singolo operatore permette un rapido riavvio a potenza ridotta. In questo modo i tempi di indisponibilità associati agli ingranaggi e al generatore sono minimizzati (figura 4), con aumento della disponibilità del 28% rispetto ad un sistema ad induzione a doppia alimentazione.*

*In questa condizione di funzionamento a potenza parziale il sistema può funzionare indefinitamente: successivamente – quando conveniente – la sostituzione del settore danneggiato può avvenire con requisiti logistici, impatto sulla produzione, necessità di attrezzature e componenti estremamente modesti. Ad esempio nel caso specifico la manutenzione dello statore avviene senza estrarre l'intero rotore. Questi vantaggi sono maggiormente apprezzabili nel caso di applicazioni off-shore per gli evidenti costi delle relative operazioni e la possibilità di accesso agli impianti, non sempre facilmente raggiungibili a causa del maltempo e/o della scarsità dei mezzi di intervento.*

*Abbiamo selezionato una topologia a flusso radiale a magnete interno e dente avvolto: teoricamente -nel caso di raffreddamento ad aria- questa soluzione garantisce una rotazione regolare ad una velocità estremamente bassa, inoltre permette lo sfruttamento della polarità più alta pos-*

*sibile (ovvero una massa attiva inferiore e costi addizionali più contenuti). A proposito della regolarità di rotazione, l'ampiezza dell'ondulazione di coppia è un aspetto fondamentale poiché non essendovi il riduttore ogni pulsazione di coppia rappresenta una componente di sollecitazione diretta a fatica sulle pale della turbina, che va a incidere sul ciclo di vita sia del materiale composito delle pale sia di altre strutture.*

*Subito nello sviluppo del lavoro abbiamo compreso che era necessario un approccio di calcolo completamente nuovo per puntare ad ottimizzare le prestazioni elettromagnetiche e raggiungere gli altri obiettivi progettuali. Abbiamo quindi sviluppato ad hoc un software di calcolo ibrido FEM – analitico che ci ha permesso di valutare gli indesiderati effetti esercitati sulle parti rotanti dalle sub-armoniche di campo magnetico congeniti alla configurazione scelta. Tramite questo strumento abbiamo portato avanti una campagna di calcolo volta a identificare le combinazioni di poli e cave che meglio riescono a mitigare i suddetti effetti nella cosiddetta "ricerca delle coppie magiche". Alla fine abbiamo preso in considerazione le coppie magiche che meglio corrispondevano alle nostre esigenze progettuali complessive ed abbiamo iniziato a progettare i dettagli del macchinario usando metodi FEM più standard.*

*Il gruppo di lavoro dedicato alla fabbricazione si è trovato esso stesso coinvolto nella fase progettuale: infatti era necessario un suo coinvolgimento fin da subito per identificare una soluzione che potenzialmente potesse essere prodotta praticamente in serie, e che usufruisse quindi di tempi di consegna ridotti e costi contenuti. Una sfida significativa ha riguardato anche l'identificazione di un metodo economico per formare le bobine in piattina per media tensione alternata avvolte di costa, e per gestire la costruzione e l'assemblaggio dei settori e dei componenti voluminosi con tolleranze dimensionali entro limiti molto stretti.*

*Il laboratorio ha quindi effettuato una serie di test per fornire indicazioni critiche sulla fattibilità di costruzioni alternative agendo per tentativi su diversi campioni e fornendo valutazioni attendibili sulle migliori sequenze di montaggio dei subcomponenti e sulle tolleranze dimensionali da raggiungere. Entrambi i gruppi di lavoro, progettazione e produzione, hanno ottenuto risultati ragguardevoli nonostante i limiti nei tempi di esecuzione del progetto e nella distribuzione delle risorse economiche.*

*I risultati teorici di questo progetto sono stati resi possibili grazie al gruppo di ricerca dello stabilimento di Monfalcone. Le competenze dei nostri giovani e appassionati colleghi hanno permesso di ampliare le nostre conoscenze nel campo dell'elettromagnetismo, della meccanica e della fluidodinamica attraverso l'uso di approcci innovativi all'elaborazione di computer potenti; queste competenze si sono*



Rated rotation speed	14 rpm	Velocità di rotazione nominale	14 giri/min
Rated generating power	700 kW	Potenza di generazione nominale	700 kW
Rotation speed range	0-20 rpm	Intervallo di velocità di Rotazione	0-20 giri/min
Cooling system	air natural convection	Sistema di raffreddamento	convezione naturale con aria
Voltage*	naturally born 3.3 kV	Tensione*	naturalmente prodotta 3.3 kV
Pole number	136	Numero di poli	136
Stator winding	wound tooth	Avvolgimento Statorico	wound tooth (dente ferito)
Rotor configuration	IPM (internal permanent magnet)	Configurazione rotorica	MPI (magneti permanenti interna)
Construction	modular: replaceable rotor and stator sectors	Costruzione	modulare: settori statorici e rotorici sostituibili
Rated torque	480 kNm	Coppia nominale	480 kNm
Energy efficiency**	$\eta \approx 96\% + \text{good partial load}$	Rendimento energetico**	$\eta \approx 96\% + \text{buon carico parziale}$
Fault tolerant	$P' = 350 \text{ kW}$	Tolleranza avarie	$P' = 350 \text{ kW}$
Cogging torque	$\leq 0.02\%$	Coppia di sbazzatura	$\leq 0.02\%$
Ripple torque	$< 2\%$	Oscillazione di coppia	$< 2\%$
Mass	32 ton	Massa	32 tonnellate
Active parts diameter	4 mt	Diametro Parti attive	4 metri
Grid interface	all international rules ok	Interfaccia in rete	ok tutte le regole internazionali
Off-shore ready	corrosion resistant materials and solutions	Predisposizione per Off-shore	Soluzioni e materiali resistenti alla corrosione
Easy to transport	highway normalized special shipping	Facilità di trasporto	Carico speciale normalizzato in autostrada
* most of the competition is limited to 690V construction with bulky cabling		* la maggior parte della concorrenza è limitata a costruzioni a 690 V con cablaggi ingombranti	
** 96% is the highest value declared by the competition on this type of machines.		** il 96% è il valore più alto dichiarato dalla concorrenza su questo tipo di macchine	

turing that could optimize lead times and manufacturing costs even further. As a system specialist, we are also studying a new control system strategy: in fact when a sensorless algorithm for anisotropic structures is available, the exploitation of the full machine capabilities will be possible.

The introduction of a modular design represents one of the most interesting innovations emerging from this project. Since the fault tolerance capability allowed by the separation of the machine's active parts into sectors has been successfully proven, one of the most promising future challenges is related to the application of this concept to faster, form wound double layer winding PM constructions (hybrid drive generator). However the positive and strongly innovative results gained now allow ASI a higher degree of confidence in facing this challenge.

Beyond the very important technical innovation gained, an important lesson learnt is that teamwork and cooperation between departments -however difficult it can be- is the key to share know-how and ideas that enable the achievement of such demanding results.

The Lean Manufacturing philosophy approach helped in keeping the pace with an extremely strict timetable, and staying focused on the right targets during the syn- copated design development.

The experience on this complex project with its "wide kaizen team" effectiveness is already been used as a starting point for our future developments in this field.

Customers come to us for our engineering know-how and experience. A wind turbine manufacturer wanting to make the switch to permanent magnet technology, wishing to increase turbine size or tackle the challenges of far offshore wind, needs to know he can rely on us to reduce the technological and economical risks involved in this type of development. This project has demonstrated ASI capabilities on several levels.

The prototype was developed with large scale production in mind. The early involvement of the manufacturing team in the design phase of the project meant that there were few surprises in the factory during the manufacture of the machine.

Innovations to reduce lead times and material costs were also identified early on and incorporated into the design of the machine. Furthermore, the project was carried out within the time frame and allocated costs. This is a clear demonstration of the commitment of ASI team.

The innovative modular solution we introduced to allow partial load operation for installations in hard to reach areas, particularly for offshore applications, is also a clear example of our will to meet Customers' needs.

positivamente sposate con la conoscenza dei nostri progettisti meccanici più esperti. Lo sviluppo di software e calcoli computerizzati è durato più di sei mesi e ha coinvolto risorse di ASI e dell'Università di Trieste; dalle bozze di calcolo iniziali al prototipo finito è trascorso circa un anno.

Da un punto di vista produttivo, innovazioni importanti sono state rese possibili grazie alla dedizione di differenti competenze provenienti dal dipartimento di tecnologie della costruzione e della produzione. In particolare, le soluzioni riguardanti la formazione della bobina e dei settori sono state identificate da un gruppo di lavoro dedicato proveniente dalla linea dei motori in CC, che ha fornito valutazioni costruttive nonché linee guida per alcuni punti progettuali in sospeso; assemblaggio e montaggio finale sono stati invece a carico della linea CA.

L'intero progetto è stato completato in diciotto mesi come previsto; una foto del rotore del prototipo è visibile in Fig.5.

Le discussioni e gli sviluppi che ci sono stati durante la fase di progettazione hanno introdotto anche altre soluzioni degne di nota: flange di pressione laminate integrali con il circuito magnetico e i magneti NdFeB incapsulati con protezione integrale alla corrosione. E' già previsto che queste soluzioni siano adottate in future macchine a magneti permanenti.

La scelta è stata di costruire una macchina a diametro naturale, ma assialmente più corta rispetto al generatore 2MW presente sul mercato; tuttavia il prototipo presenta la velocità più bassa, il diametro più grande e i valori di coppia più elevati di qualsiasi altra macchina fino ad ora prodotta a Monfalcone. I numeri di giri ed il sistema isolante sono adatti per i 3.3kV, anche se, a causa della lunghezza assiale inferiore, nella campagna di test il prototipo ha agito con una coppia di invertitori a bassa tensione GT3000 (690V), cfr. Fig.6.

Dal momento che i valori di coppia sono estremamente alti, per poter effettuare test a pieno carico, è stata allestita una configurazione ad asse elettrico interno, usando due differenti convertitori con condivisione del DC bus. In questo modo, una metà della macchina ha operato come motore e la parte simmetrica rimanente come generatore. Così facendo -a parte le perdite di sistema- il flusso di potenza principale passa attraverso il bus in continua, quindi il macchinario ruota senza richiesta di ulteriori carichi esterni o motori elettrici. Questa è la prima volta che una simile procedura di test è stata usata presso i laboratori di Monfalcone.

La campagna di test si è conclusa con successo a maggio 2010; i principali dati sulle caratteristiche di costruzione e sui risultati dei test sono riportati nella tabella di seguito e confermano il raggiungimento degli obiettivi progettuali.

### Conclusioni e futuri sviluppi

Ansaldo Sistemi Industriali ha intenzione di continuare a testare il prototipo e ha già identificato importanti semplificazioni nella tempistica, nella distribuzione dei costi da sostenere nella produzione della bobina che potrebbero ulteriormente ottimizzare i tempi di consegna e i costi di produzione. I nostri specialisti dei sistemi di controllo stanno anche studiando una strategia per un nuovo algoritmo di controllo: quando sarà disponibile un algoritmo sensorless per strutture anisotrope, sarà possibile lo sfruttamento completo di tutte le potenzialità della macchina.

L'introduzione di un progetto modulare rappresenta una delle innovazioni più interessanti emerse da questo studio. Visto che è stata testata con successo la capacità di tollerare i guasti (permessa dalla separazione in settori delle parti attive della macchina), la sfida che abbiamo già raccolto riguarda l'applicazione del medesimo concetto a macchine MP più veloci con ad avvolgimento embricato a doppio strato. Senza dubbio i risultati dell'innovazione raggiunti permettono ad ASI di affrontare la suddetta sfida in modo più confidente.

Il raggiungimento dei risultati tecnici importanti raggiunti ci ha fatto sperimentare l'importanza della cooperazione sia all'interno dello stesso gruppo di lavoro sia nella condivisione trasversale di competenze e conoscenze.

La filosofia di Lean Manufacturing ci ha permesso di stare al passo con i tempi stretti previsti dalle scadenze progettuali e di focalizzare l'attenzione sui reali obiettivi da raggiungere durante le concitate fasi dello sviluppo. Di fatto l'esperienza maturata nel corso di questo complesso progetto -attraverso il "wide kaizen team"- è già la base attuale delle attività in corso in settori simili.

I clienti vengono da noi per la competenza ingegneristica e l'esperienza nel settore. Un costruttore di generatori eolici che vuole usare la tecnologia dei magneti permanenti e che desidera aumentare la dimensione del generatore o affrontare le sfide del vento in spazi aperti, può affidarsi alla queste esperienze nel ridurre i rischi tecnologici ed economici.

Questo progetto ha dimostrato le capacità di ASI in diversi aspetti: il prototipo è stato costruito in vista di una produzione su ampia scala; il preventivo coinvolgimento della manifattura dalla fase iniziale di elaborazione del progetto ha evitato il rischio di spiacevoli sorprese durante la fase di costruzione del macchinario, e in questo modo innovazioni significative sono state utilizzate già nella fase progettuale.

Non da trascurare, il progetto è stato condotto nell'ambito dei tempi previsti e dei costi allocati. Questa è una chiara dimostrazione della professionalità e dell'impegno di tutto il personale ASI coinvolto.

