



Universita' degli Studi dell'Aquila  
Dip. di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia

# Dimensionamento e soluzioni tecnologiche innovative per motori elettrici ad alta efficienza

Marco Villani

# ***Introduzione***

---

L'esigenza di contenere i consumi di energia elettrica nel settore dei motori, ha stimolato negli ultimi anni sia gli Utilizzatori, verso una scelta piu' razionale dei motori stessi, ma soprattutto i Costruttori verso l'impiego di nuove tecnologie per la loro costruzione.

# ***Introduzione***

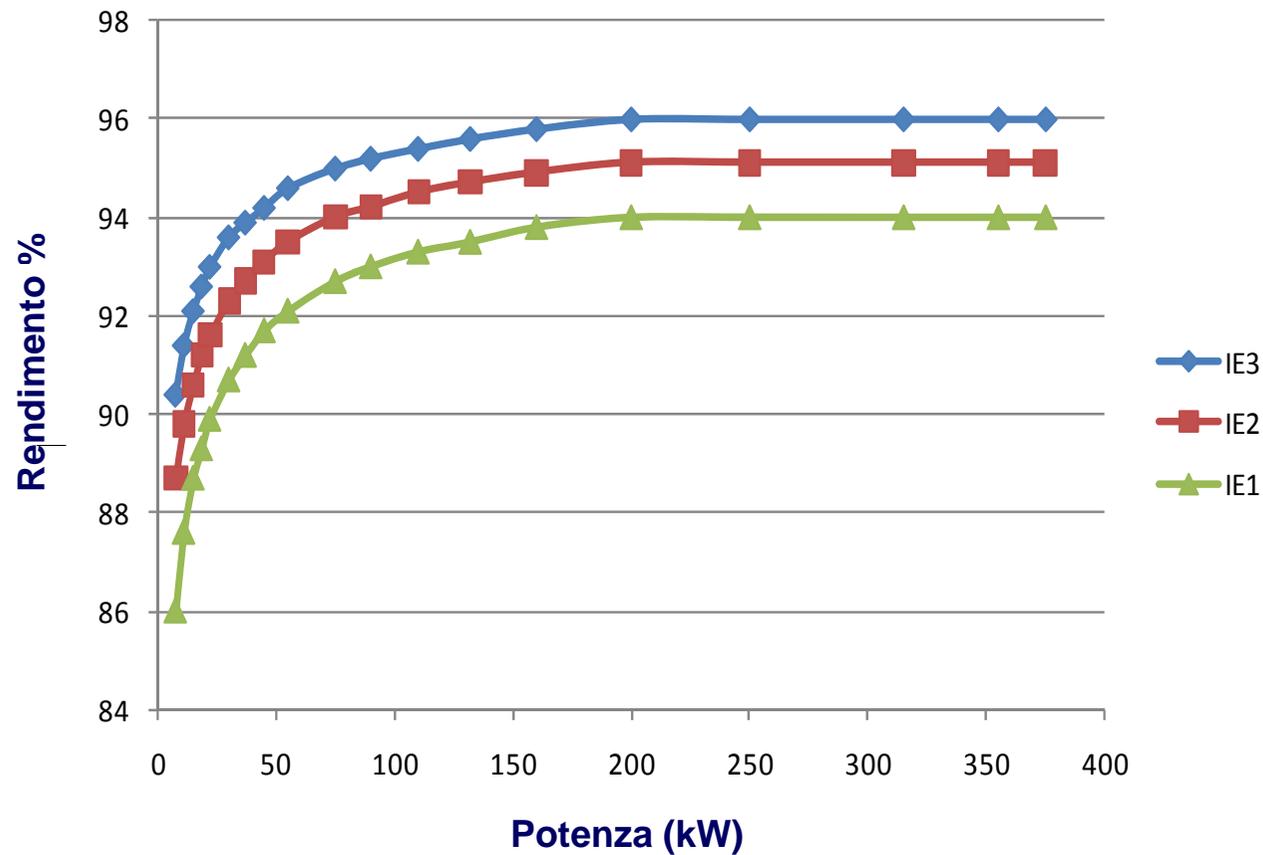
---

L'adeguamento delle tecnologie oggi generalmente adottate e l'utilizzo di nuovi criteri di progettazione sembrano essere i metodi più efficaci per ottenere dei prodotti con caratteristiche adeguate alla attuale situazione energetica.

# Regolamento 640/2009 - Classi di efficienza

---

## Motori Asincroni trifase (4 poli)



# ***Regolamento 640/2009 - Prossime scadenze***

---

## **a partire dal 1° gennaio 2015:**

i motori con una potenza nominale compresa tra 7,5 e 375 kW devono avere come minimo il livello di efficienza **IE3** oppure il livello di efficienza **IE2** se muniti di Inverter.

## **a partire dal 1° gennaio 2017:**

tutti i motori con una potenza nominale compresa tra 0,75 e 375 kW devono avere come minimo il livello di efficienza **IE3** oppure il livello di efficienza **IE2** se muniti di Inverter.

# ***Motori Asincroni ad alta efficienza***

---

Le nuove classi di efficienza e le prossime scadenze aprono nuovi scenari per i Costruttori di motori elettrici.

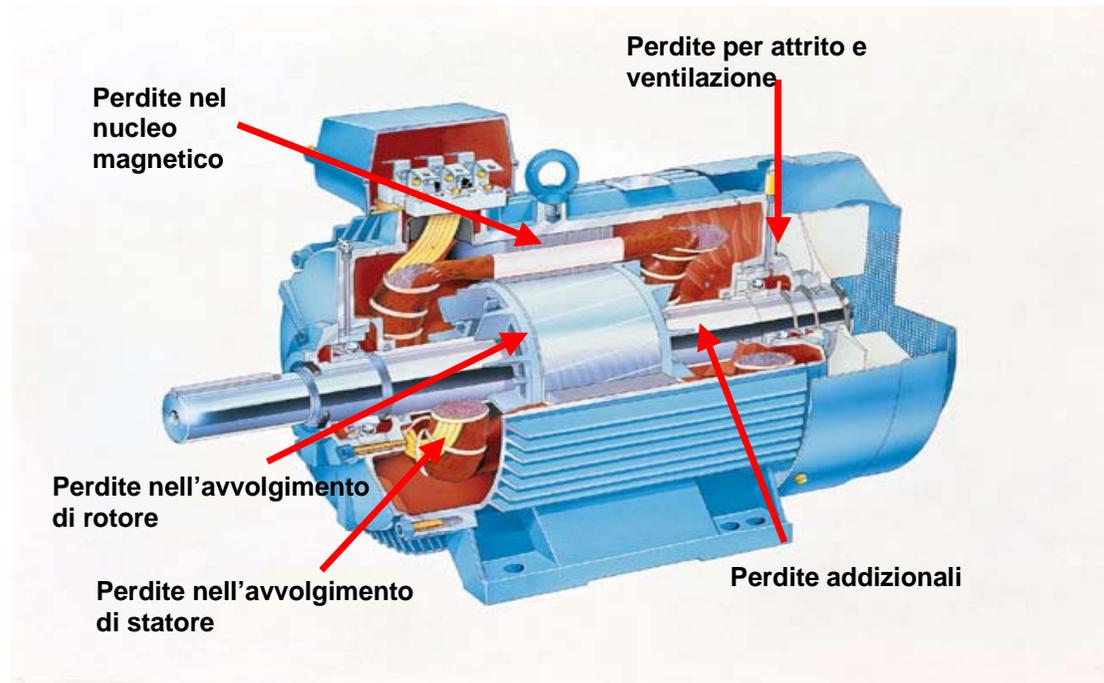
L'efficienza energetica può essere per l'industria elettromeccanica italiana una grande opportunità di sviluppo e di innovazione di prodotto.

E' diventato ormai ineludibile, per mantenere la competitività a livello internazionale, l'adeguamento dei processi produttivi relativi alle nuove classi di motori elettrici ad elevata efficienza energetica.

# Aumento del rendimento



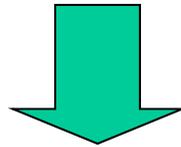
## Riduzione delle perdite del motore



## Tipica distribuzione delle perdite (4 poli)

	%	Fattori che incidono sulle perdite
$P_J$ avvolg. stat.	30-50	Sezione e tipo di conduttore statorico
$P_J$ gabbia. rot.	20-25	Sezione e tipo di conduttore rotorico
Perdite nel ferro	20-25	Qualita' del lamierino
Perdite addizionali	5-15	Progettazione e costruzione
Perdite a.v.	5-10	Scelta dei cuscinetti e della ventola

Le nuove tecnologie e l'impiego di programmi di calcolo avanzati rappresentano gli strumenti più efficaci per ottenere motori ad alta efficienza.

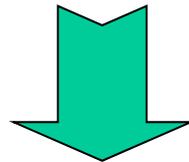


- materiali attivi di ottima qualità
- soluzioni tecnologiche innovative
- progetto ottimizzato per l'alta efficienza

Tecnologia:            1. Lamierini a “prestazioni migliorate”  
                                 2. Gabbia in rame pressofusa

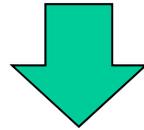
+

Progettazione:    3. Progettazione ottimizzata



Motori Asincroni ad alta efficienza (IE2, IE3, IE4)  
ottimizzati e **non sovradimensionati**.

L'aumento dell'efficienza del motore comporta inoltre



minore produzione di calore consentendo, di conseguenza, l'utilizzo di ventole di raffreddamento più piccole, riducendo le perdite meccaniche.

Una attenta progettazione del motore consente inoltre di avere una **curva di rendimento** quasi “piatta” in grado di assicurare, anche in caso di variazioni del carico, un rendimento sempre prossimo a quello **ottimale**.

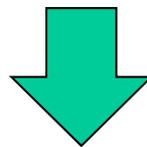
# 1. Lamierino magnetico

---

Il lamierino magnetico riveste un ruolo importante ed incide sulle prestazioni del motore.

La scelta del lamierino e' determinante, ma spesso i Costruttori sono condizionati dal :

- costo;
- facile reperibilita';
- tranciabilita'.



Per i motori ad alta efficienza' e' preferibile utilizzare i nuovi lamierini "premium steel" ad **alta "permeabilita' magnetica"** e **basse "perdite specifiche"** ( $P_{fe}$ ,  $I_{\mu}$ ).

## ***2. Gabbia in rame pressofusa***

---

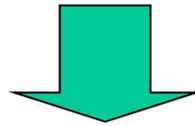
La pressofusione in alluminio e' un processo largamente utilizzato da numerosi Costruttori.

E' noto che la sostituzione della gabbia in alluminio con la **gabbia in rame pressofusa** permette di migliorare in modo significativo il rendimento del motore asincrono.

Studi condotti da UnivAQ hanno dimostrato che l'impiego della gabbia in rame permette di ridurre le perdite del **15% ÷ 20%** rispetto al motore in alluminio.

## 2. *Gabbia in rame pressofusa*

---



- Miglioramento dell'efficienza (IE3, IE4) e riduzione dei costi di esercizio.
  - Aumento della Coppia max (rispetto al motore in Al)
  - Bassi scorrimenti.
  - Pesi ridotti (a parità di efficienza)
- 👉 Progettazione accurata del motore in modo da migliorare la Coppia di avviamento.

## ***2. Gabbia in rame pressofusa***

---

La pressofusione in rame e' ormai un processo maturo che consente di ottenere rotori di ottima qualita' in un ampio range di potenze.



## ***2. Gabbia in rame pressofusa***

---

L'UnivAQ ha studiato l'impiego dei rotori in rame pressofusa grazie alla collaborazione con **FAVI** ed **EuroCopper** per:

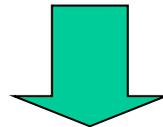
- motori asincroni trifase (50 Hz);
- motori asincroni trifase alimentati da Inverter;
- motori asincroni monofase per elettrodomestici.

## 3. Progettazione

---

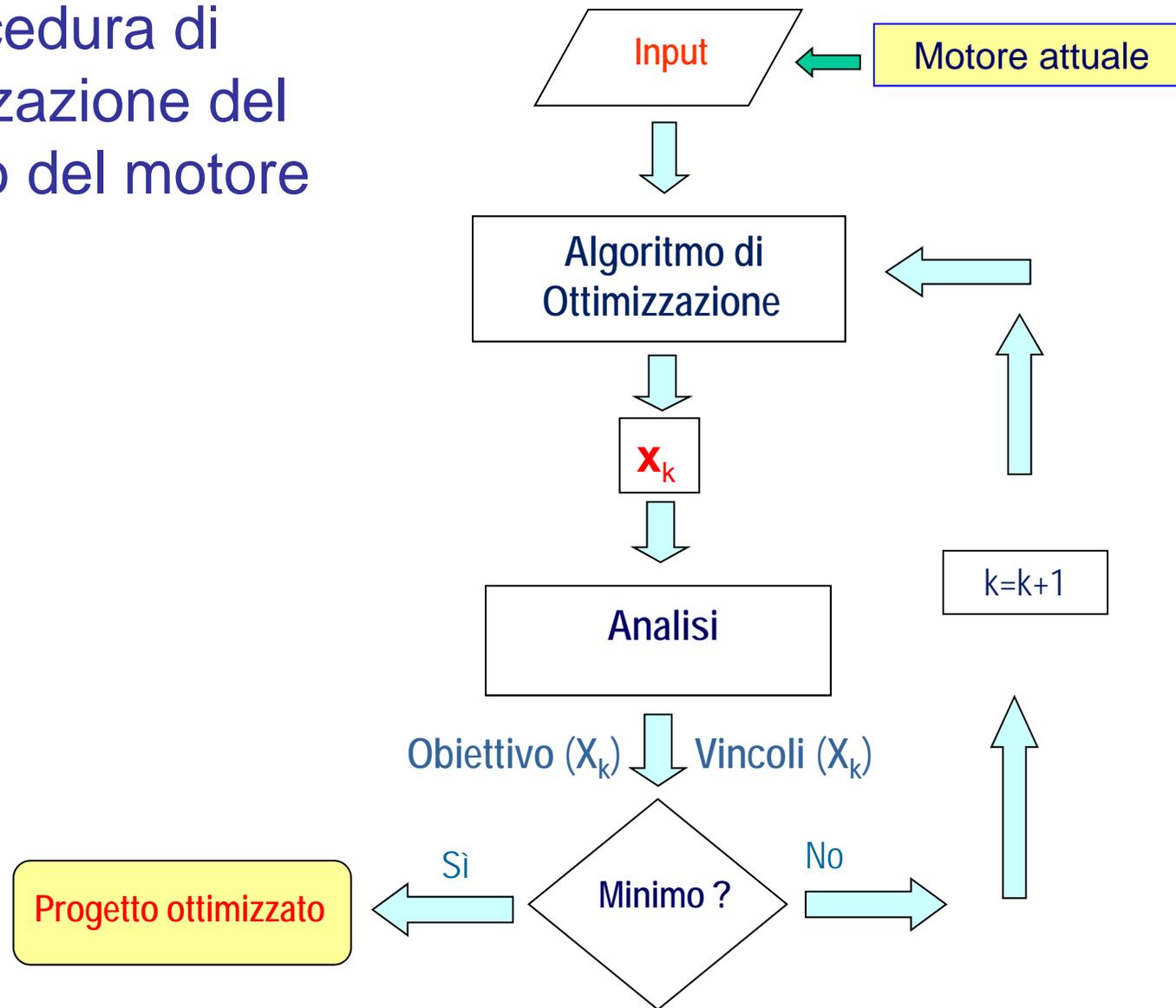
Non sempre l'impiego di nuovi materiali consente di raggiungere alti livelli di efficienza.

E' necessaria un'attenta **riprogettazione del motore**, soprattutto nella ricerca della migliore distribuzione dello spazio disponibile tra i materiali attivi (ferro e rame), considerando che la semplice conoscenza dei principi fisici su cui e' basato il suo funzionamento e l'esperienza che ne deriva dalle macchine gia' costruite non sono sufficienti, oggi, per raggiungere l'obiettivo di una ottimizzazione energetica del progetto del motore.



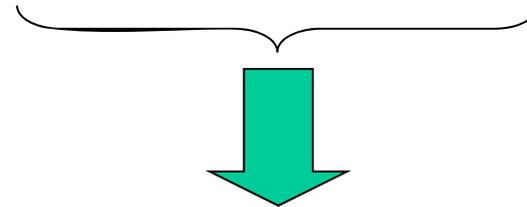
**Progettazione ottimizzata del motore**

# Procedura di ottimizzazione del progetto del motore



## ***Obiettivo***

- *Rendimento;*
- *Densita' di potenza;*
- *Coppia all'avviamento;*
- *Costo di costruzione;*
- *Combinazione di piu' obiettivi:  $F_1(X) + F_2(X) \dots$*

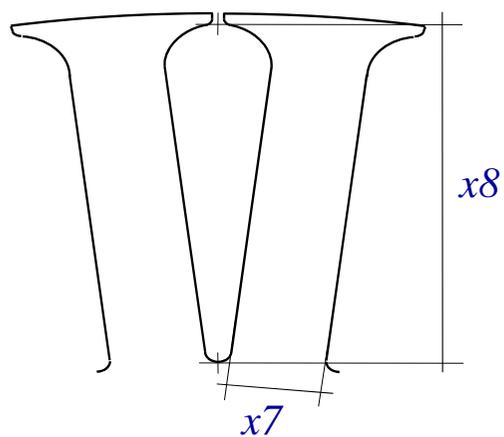
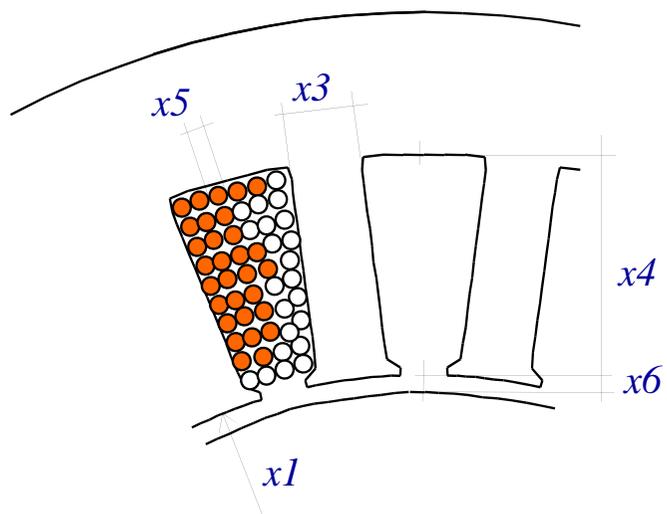
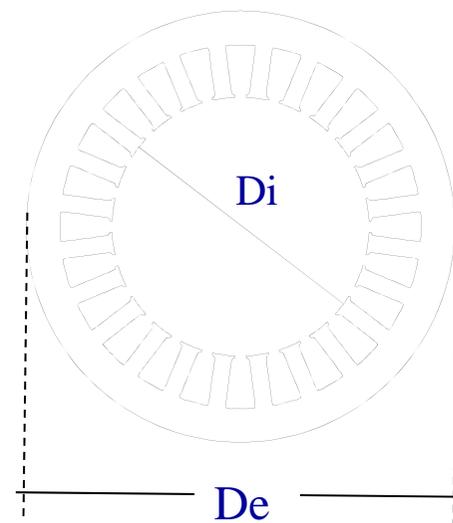
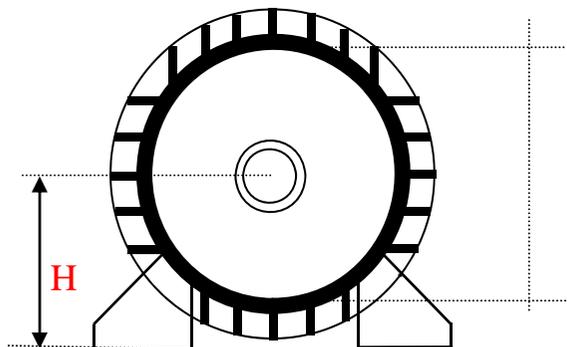
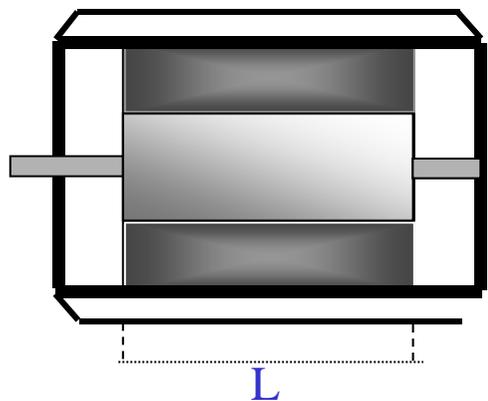


*Problema Multi-obiettivo*

## ***Vincoli***

- *Temperature;*
- *Fattore di potenza;*
- *Coppia massima;*
- *Corrente all'avviamento;*
- *Vincoli geometrici;*
- *Fattore di riempimento cava;*
- *...*

## Variabili di progetto



## **Strategie di riprogettazione**

La scelta del n. di variabili di progetto incide sulle strategie di riprogettazione del motore e quindi sui costi di investimento per il Costruttore.

### **Possibili scenari**

Riprogettazione a “basso costo”

“costo medio”

“alto costo”

## **1. Basso costo**



- Lamierino “premium steel”
- Aumento Lpacco (\*)
- Modifica avvolgimento stat.
- Tranciato stat./rot. invariato

(\*) compatibile con le carcasse normalizzate

## **2. Costo medio**



- (1) +
- Gabbia in rame pressofusa

## **3. Alto costo**



- (2) +
- Nuovo tranciato stat./rot.
- Aumento del diametro esterno
- Nuova carcassa

# ***Attivita' di ricerca di UnivAQ***

---

## **Progetti europei:**

- **SAVE II** - “Study on Technical/economic and Cost/benefit Analyses of Energy Efficiency Improvements in Industrial Three-Phase Induction Motors”.
- **SAVE II** - “Barriers Against Energy Efficiency Motor Repair”.

**Progetto COFIN:** “Energetic efficiency increase in electric motors and drives for industrial and civil applications”

## Partners:

- ThyssenKrupp, Centro Sviluppo Materiali
- Siemens
- Leroy-Somer
- ElectroAdda
- Lafert Motori Elettrici
- Bonfiglioli Riduttori
- FAVI (Fonderie et Atelier du Vlmeu)
- EuroCopper.

## ***Attività' di ricerca di UnivAQ***

---

L'impiego delle nuove metodologie di progettazione e delle nuove soluzioni tecnologiche ha portato alla realizzazione di numerosi prototipi di motori asincroni trifase ad "alta efficienza".

Questi motori vogliono essere una dimostrazione pratica dei risultati potenzialmente conseguibili attraverso un'attenta e mirata progettazione del motore ed una scelta adeguata dei materiali attivi.

# *Alcuni esempi*

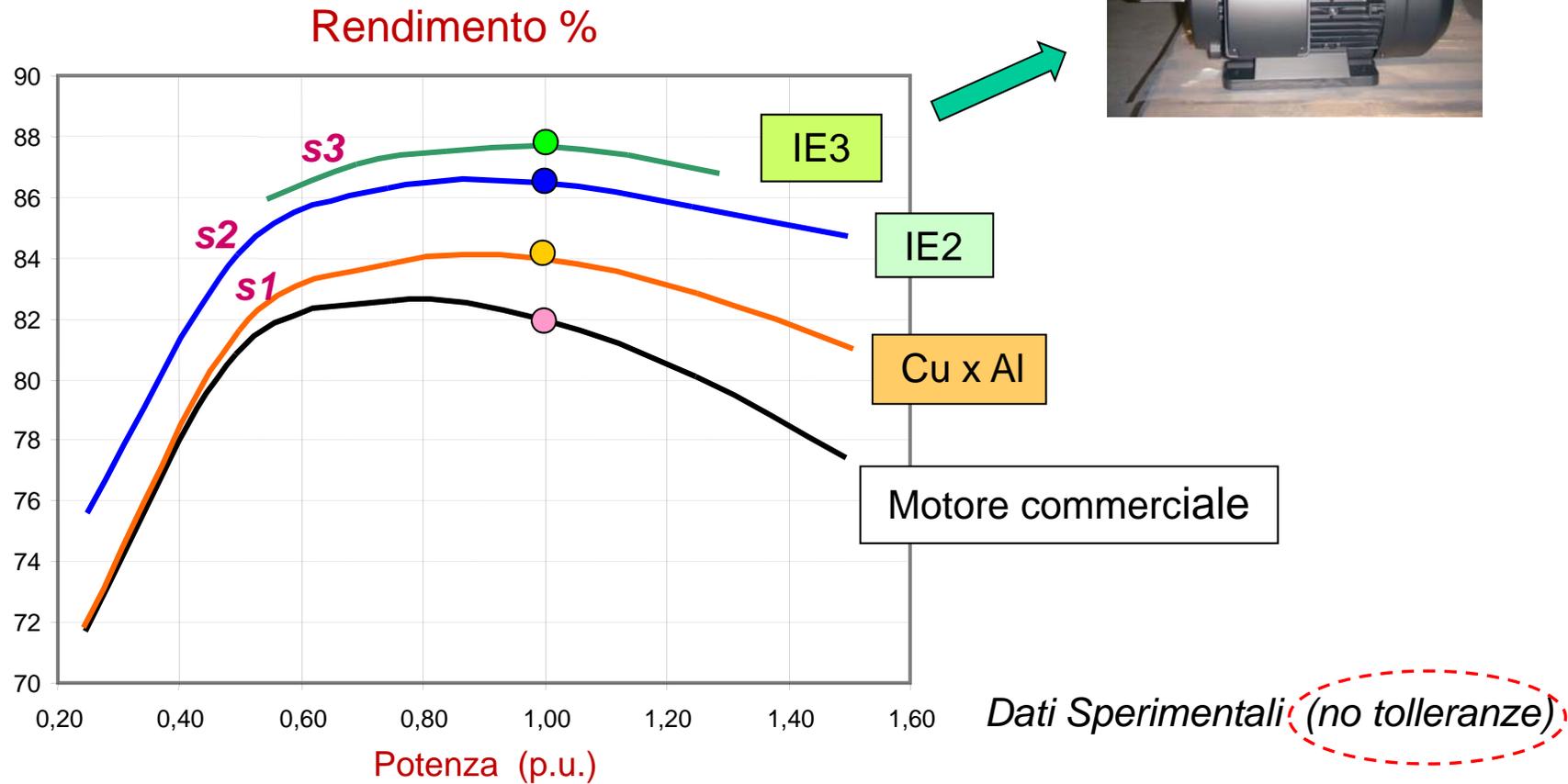
---

Riprogettazione di motori Asincroni trifase (400V/50Hz/TEFC) per impieghi industriali, adottando le soluzioni proposte:

- s1)** sostituzione della gabbia in Al con gabbia in Cu;
- s2)** s1 + “premium” steel + Lpacco + nuovo avvolgimento;
- s3)** s2 + riprogettazione completa del tranciato.

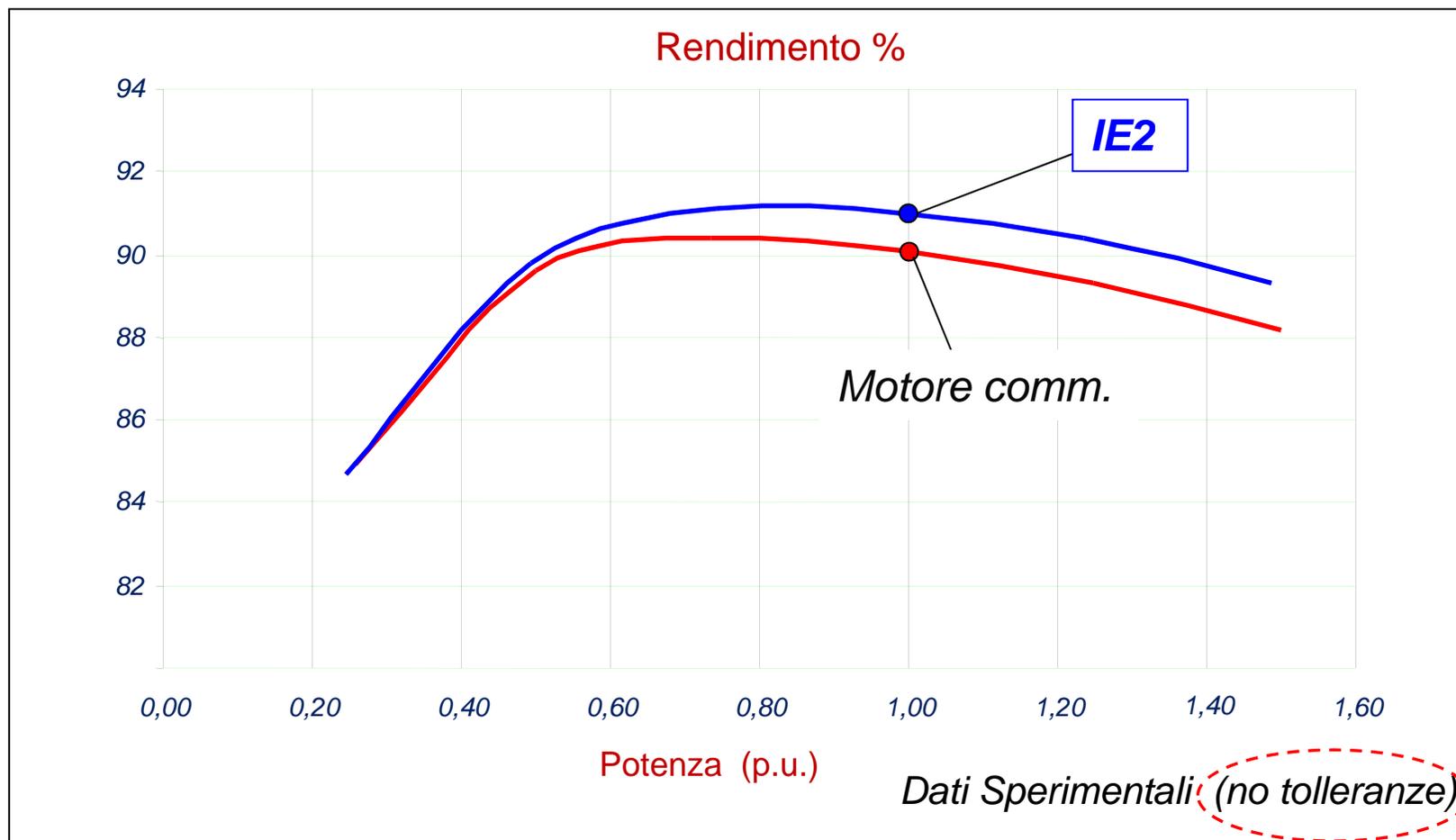
**Obiettivo:** valutare l'incidenza di ogni intervento sul rendimento del motore e verificare il raggiungimento dei livelli di efficienza IE2 e IE3.

3 kW, 4 poli, 400 V, 50 Hz, TEFC  
Gabbia in Cu + Premium steel + Ottimizzazione



Il motore ottimizzato IE3 presenta una curva abbastanza piatta e in grado di assicurare, anche in caso di variazioni del carico, un rendimento sempre prossimo a quello ottimale.

15 kW, 4 poli, 400 V, 50 Hz, TEFC  
Gabbia in Cu + Premium steel



# ***Confronto gabbia in Cu - Al***

---

Un recente studio in collaborazione con **EuroCopper** ha permesso di progettare e confrontare diverse taglie di motori asincroni trifase con gabbia in Cu e Al in **classe IE3**.



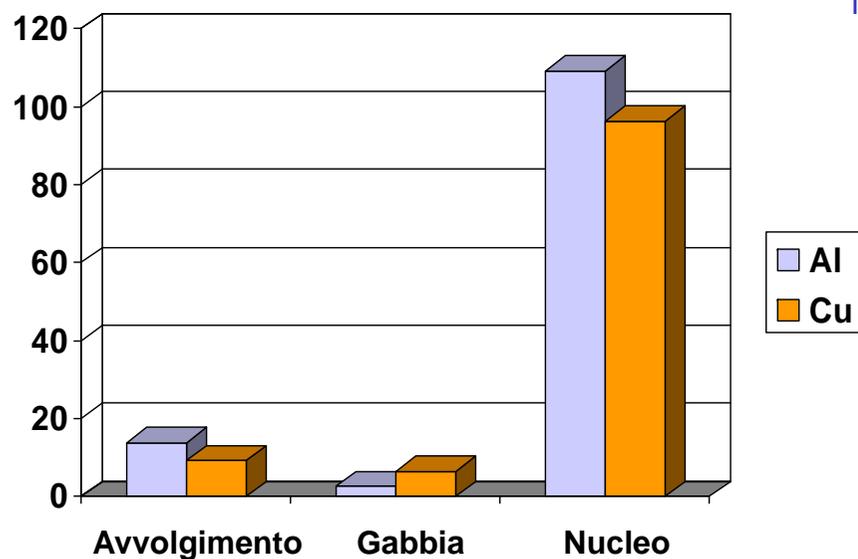
***Vs***



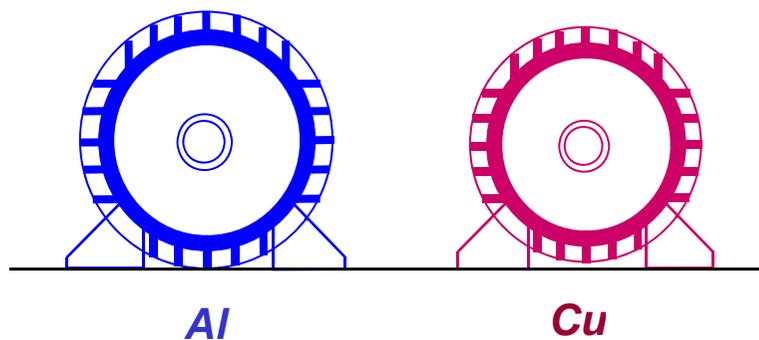
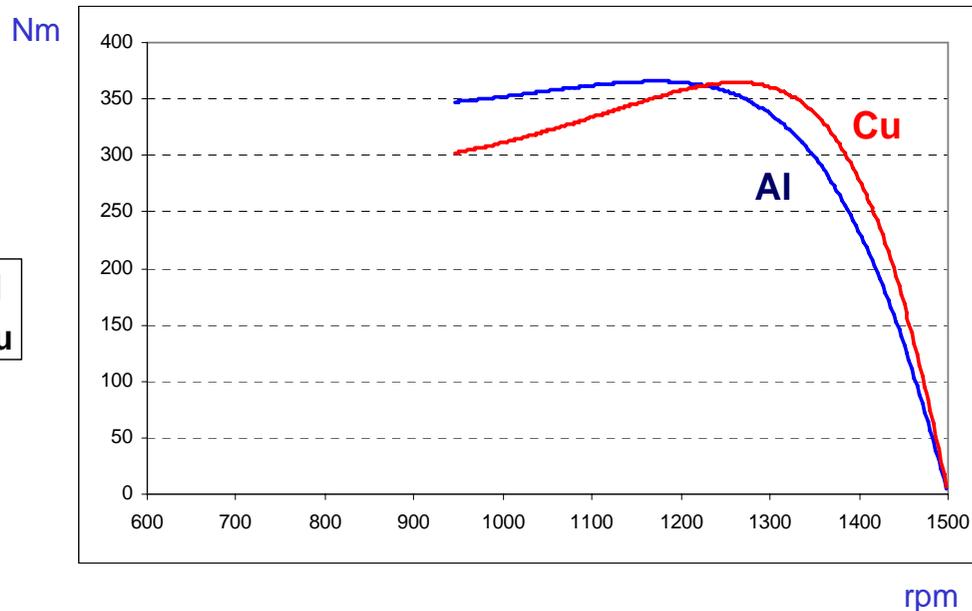
F.Parasiliti, M.Villani, "IE3 Efficiency Induction Motors with Aluminum and Copper Rotor Cage: Technical and Economic Comparison", Journal of Energy and Power Engineering 8 (2014) , pp. 902-910,

## 15 kW, 4 poli, IE3

Peso materiali attivi (kg)



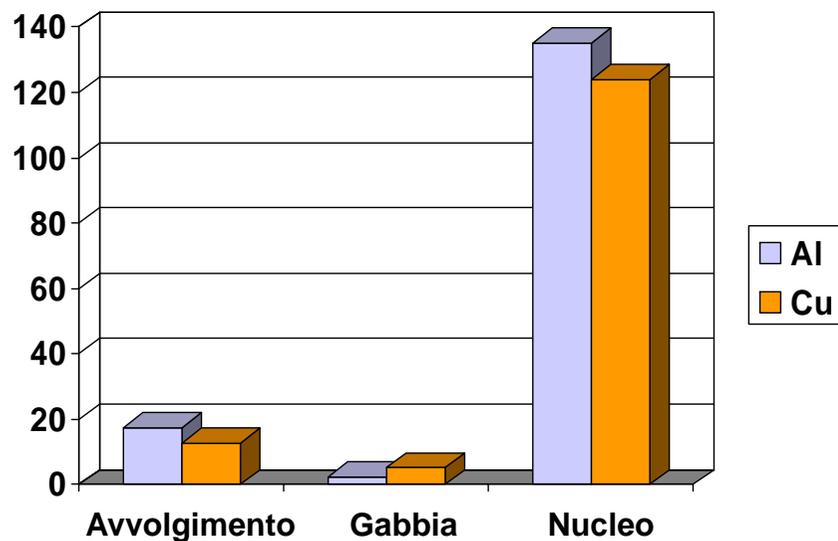
Coppia-Velocita'



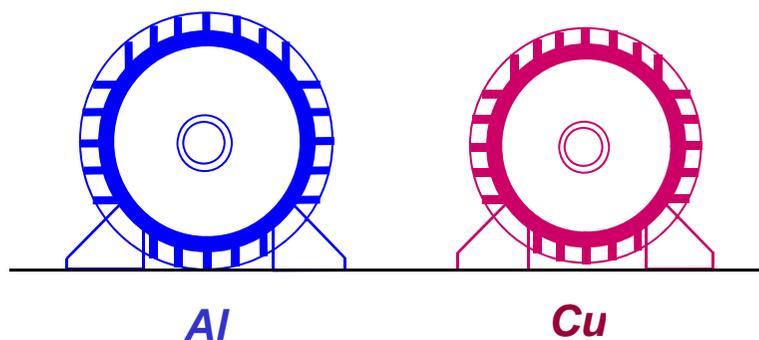
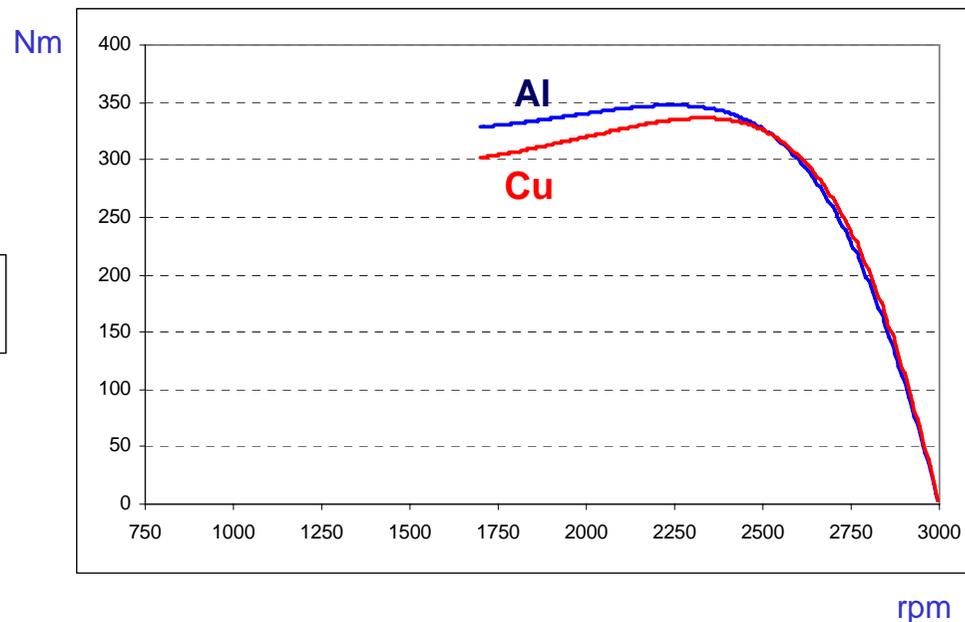
Il motore con gabbia in **Cu** ha un volume e peso **inferiori** rispetto al motore in **Al** (a parita' di rendimento e prestazioni).  
Per motori **Al** in **IE3** non e' sempre possibile utilizzare carcasse normalizzate.

## 22 kW, 2 poli, IE3

Peso materiali attivi (kg)



Coppia-Velocita'



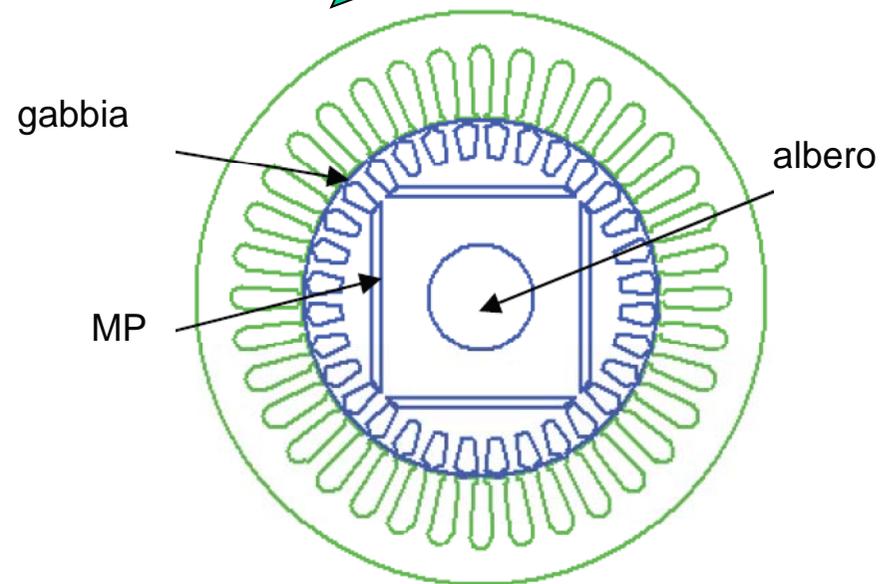
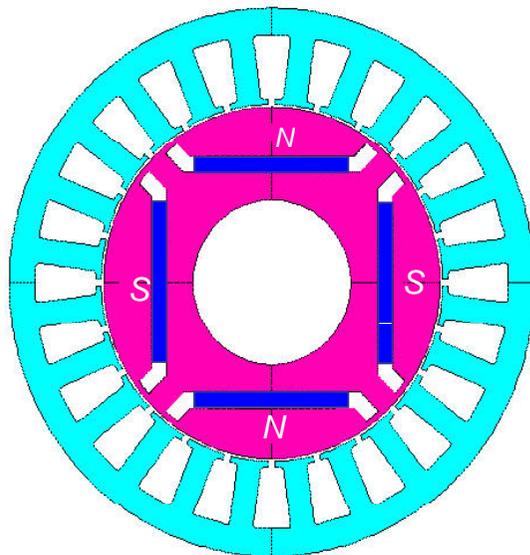
Il motore con gabbia in **Cu** ha un volume e peso inferiori rispetto al motore in **Al** (a parita' di rendimento e prestazioni) ed e' compatibile con le carcasse normalizzate.

# Soluzioni alternative per IE4, IE5

## Motori Brushless a MP

- Alta efficienza e  $\cos\varphi$
- Alta densita' di potenza
- Elevata affidabilita'
- Possibilita' di avviamento da rete

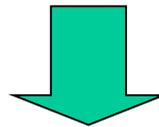
Line start PM motor



# ***La riparazione dei motori elettrici***

---

Il risparmio energetico passa anche attraverso una  
attenta riparazione dei motori ad alta efficienza



Vita media del motore

	Potenza (kW)			
	<b>0.75-1.1</b>	<b>1.1-11</b>	<b>11-110</b>	<b>110-370</b>
	10 anni	12 anni	15 anni	20 anni

N. medio di riparazioni ➤ **2 ÷ 2.5**

## Effetti sull'efficienza del motore

- **Riparazione a “regola d'arte”** nessuna conseguenza sull'efficienza.
- **“Buona” riparazione** riduzione dell'efficienza di circa 1 %.
- **“Pessima” riparazione** riduzione dell'efficienza fino a 4 %.

 I motori **IE2 IE3 riparati** devono avere lo stesso valore di rendimento riportato sulla targhetta.

La Comunita' Europea ha promosso delle campagne di informazione per illustrare ai Riparatori le tecniche piu' idonee per una corretta riparazione che non penalizzi il rendimento del motore (SAVE II).

# ***Conclusioni***

---

La ricerca mette oggi a disposizione tecnologie innovative che, unite ad una più attenta progettazione capace di ottimizzare le parti attive, consente di costruire motori altamente efficienti.

Per raggiungere i nuovi (e più stringenti) livelli di efficienza (IE4 e IE5) e' consigliabile adottare le soluzioni proposte o ricorrere a nuove tipologie di motori.

Particolare attenzione deve essere rivolta alla riparazione dei motori attraverso interventi che non penalizzino il rendimento e quindi i consumi.

Le nuove classi di efficienza e le prossime scadenze aprono nuovi scenari per i Costruttori di motori elettrici.

L'efficienza energetica può essere per l'industria elettromeccanica italiana una grande opportunità di sviluppo e di innovazione di prodotto che porterà ad un adeguamento dei processi produttivi e a nuove classi di motori elettrici altamente performanti.

# Bibliografia

---

E.Chiricozzi, F. Parasiliti, G. Vigliaturo, M. Villani, "Motori Elettrici e Risparmio Energetico", ENEA-Risparmio Energetico, No.41, 1993, pp. 17-24.

E.Chiricozzi, F.Parasiliti, M.Villani, "Experience in Design Optimization of High Efficiency Induction Motors", Conferenza Internazionale "Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drive", Lisbona, settembre 1996 e pubblicato su "Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drive", Springer, giugno 1997, pp.116-137.

F.Parasiliti, M.Villani "Evaluation of the Design Options and Cost Impact of Improving Motor Efficiency", Conferenza Internazionale "Energy Efficiency in Motor Driven Systems" (EEMODS'99), Londra, settembre 1999 e pubblicato su "Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drive", Springer, giugno 2000, pp. 514-528.

E.Chiricozzi, F. Parasiliti, M. Villani "Design of Improved Efficiency Induction Motors for Minimum Additional cost", International Conference on Electrical Machines (ICEM'00), Helsinki, settembre 2000, pp. 1712-1716.

N.Bianchi, A. Boglietti, A. Di Gerlando, M. Villani, "Motors and Drives Energy Efficiency Increase in Industrial and Civil Applications: The Research approach by a Pool of Italian Universities", Conferenza Internazionale "Energy Efficiency in Motor Driven Systems" (EEMODS'02), Treviso, settembre 2002.

F.Parasiliti, M.Villani, C. Paris, G. Songini, A. Novello "Three-phase induction motor efficiency improvements with die-cast copper rotor cage and premium steel", International Conference SPEEDAM 2004, Capri, giugno 2004.

E.Chiricozzi, F. Parasiliti, M. Villani "New Materials and Innovative Technologies to Improve the Efficiency of Three-phase Induction Motors. A Case Study", International Conference on Electrical Machines (ICEM'04), Cracovia, Polonia, settembre 2004.

E.Chiricozzi, F.Parasiliti, M.Villani "Design strategies and different materials for high efficiency Induction Motors. A Comparison, Energy Efficiency in Motor Driven Systems, EEMODS 2005, Heidelberg (Germania), settembre 2005.

F.Parasiliti, M.Villani, "IE3 Efficiency Induction Motors with Aluminum and Copper Rotor Cage: Technical and Economic Comparison", Journal of Energy and Power Engineering 8 (2014) , pp. 902-910,

S.Lucidi, F.Parasiliti, F.Rinaldi, M.Villani "Finite Element Based Multi-Objective Design Optimization Procedure of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide Constant-Power Region Operation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, p. 2503-2514, ISSN: 0278-0046, 2011.



# Universita' degli Studi dell'Aquila

Dip. di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia

*Marco Villani*

*Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia*

*Universita' degli Studi dell'Aquila*

*Via Gronchi n.18*

*67100 L'Aquila*

*e-mail: marco.villani@univaq.it*

**Energy Media Event - Smart Production**

22 Ottobre 2014 - DIAGEO, Santa Vittoria d'Alba (CN)