

# Generazione eolica

## CONVERSIONE ELETTROMECCANICA

**Ing. Claudio Rossi**

Dip. Ingegneria Elettrica

Via Risorgimento, 2

40136 Bologna

Tel. 0512093564

Email  
[claudio.rossi@unibo.it](mailto:claudio.rossi@unibo.it)





## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1a. Sincrone a rotore avvolto



**statore**



**rotore**



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1a. Sincrone a rotore avvolto



**statore**



**rotore**



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1a. Sincrone a rotore avvolto

##### CARATTERISTICHE

1. Richiedono convertitore elettronico sia sullo statore che sul rotore
2. Adatte ad essere realizzate con un elevato numero di poli e quindi per velocità di rotazione basse
3. Adatte per applicazioni ad azionamento diretto (direct-drive), cioè senza riduttore
4. Efficienza elevata
5. Particolarmente adatte per applicazioni di grande potenza



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1a. Sincrone a rotore avvolto

##### LIMITI

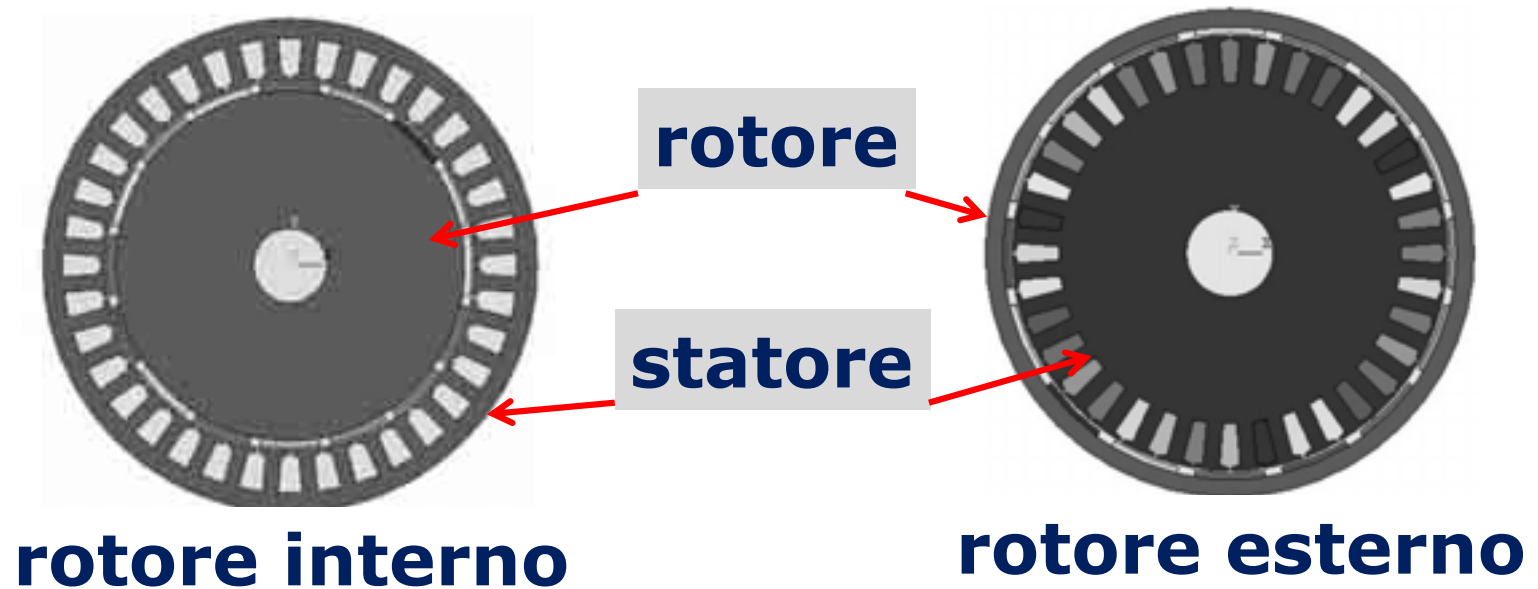
1. Costo elevato
2. Complessità costruttiva

## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1b. Sincrone a magneti permanenti (PM)

#### a flusso radiale



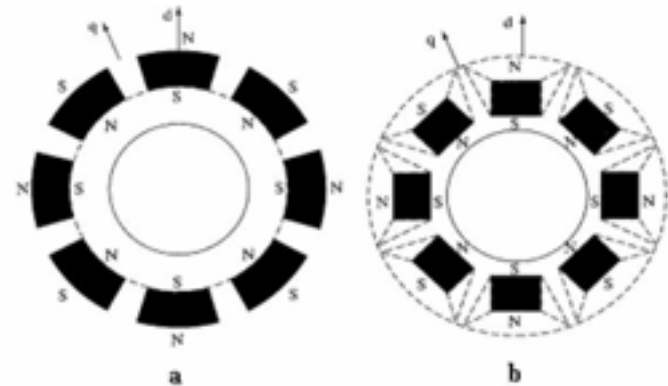


## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1b. Sincrone a magneti permanenti (PM)

#### a flusso radiale



**rotore con magneti permanenti**  
*(statore analogo alla macchina asincrona)*

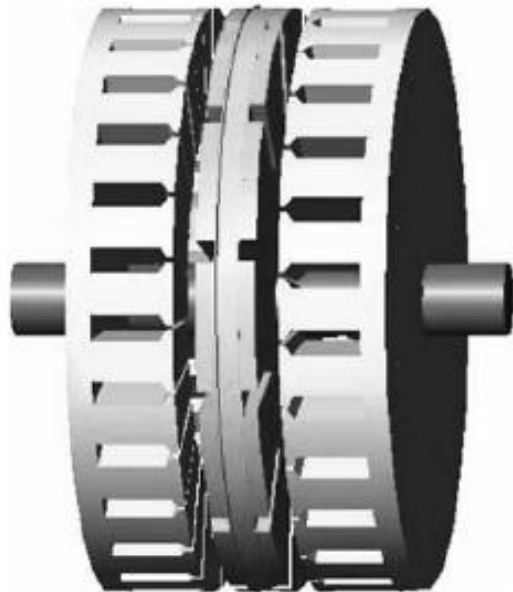


## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1b. Sincrone a magneti permanenti (PM)

#### a flusso assiale







## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1b. Sincrone a magneti permanenti (PM)

##### CARATTERISTICHE

1. Il campo magnetico è prodotto da magneti permanenti posti sul rotore
2. Richiedono convertitore elettronico solo sullo statore.
3. Adatte ad essere realizzate con un elevato numero di poli e quindi per velocità di rotazione basse
4. Adatte per applicazioni ad azionamento diretto (direct-drive), cioè senza riduttore
5. **Elevata densità di coppia** (peso ridotto)
6. Efficienza elevata



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 1b. Sincrone a magneti permanenti (PM)

##### LIMITI

1. **Costo elevato**
2. Limitata resistenza alle sollecitazioni meccaniche (vibrazioni)
3. Difficoltà di controllo a velocità di rotazione maggiori della nominale
4. Difficoltà di assemblaggio

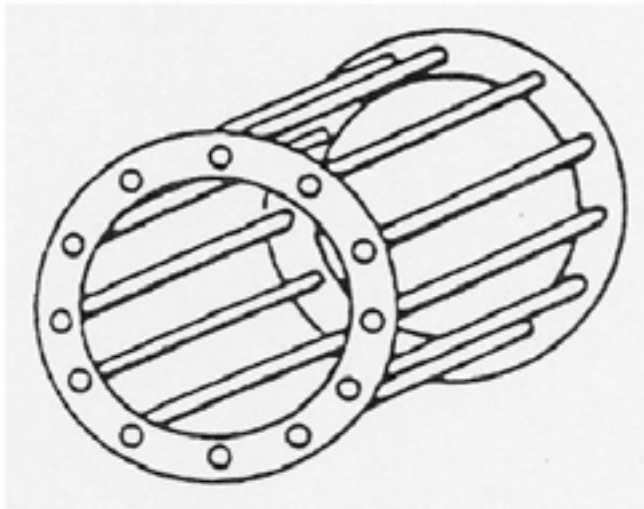
**N.B. Le macchine sincrone a magneti permanenti sono dette anche 'BRUSHLESS'**



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 2a. Asincrona con rotore a gabbia



**rotore a gabbia**



**statore**



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 2a. Asincrona con rotore a gabbia

##### CARATTERISTICHE

1. Il campo magnetico è prodotto dalle correnti indotte sul rotore. (non vi sono magneti sul rotore)
2. Richiede convertitore elettronico solo sullo statore.
3. Adatte per applicazioni ad azionamento con moltiplicatore di giri (geared).
4. **Costo ridotto**
5. Particolarmente adatta per taglie piccole e medio-piccole



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 2a. Asincrona con rotore a gabbia

##### LIMITI

1. **Efficienza inferiore** alle macchine sincrone
2. **Densità di coppia inferiore** alle macchine sincrone
3. Non particolarmente adatta ad essere realizzata con un elevato numero di poli e quindi non adatta per velocità di rotazione basse
4. Corrente magnetizzante elevata (convertitore elettronico sovradimensionato)



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 2b. Asincrona con rotore avvolto

##### CARATTERISTICHE

1. Il campo magnetico è prodotto dalle correnti indotte sul rotore che deve essere alimentato da contatti striscianti.
2. La potenza quindi può essere estratta sia dal rotore che dallo statore
3. Richiede convertitore elettronico solo sul rotore, dimensionato per circa il 30% della potenza nominale della macchina.
4. Lo statore è direttamente connesso alla rete



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 2b. Asincrona con rotore avvolto

##### CARATTERISTICHE - 2

1. Adatto a velocità di rotazione elevata. Richiede l'uso di un moltiplicatore di giri
2. Particolarmente adatto per taglie medie e medio-grandi



## 2. Conversione elettromeccanica

### Macchine elettriche

#### 2b. Asincrona con rotore avvolto

##### LIMITI

1. **Efficienza inferiore** alle macchine sincrone
2. **Densità di coppia inferiore** alle macchine sincrone
3. Non particolarmente adatta ad essere realizzata con un elevato numero di poli e quindi non adatta per velocità di rotazione basse
4. Elevata complessità del sistema di controllo



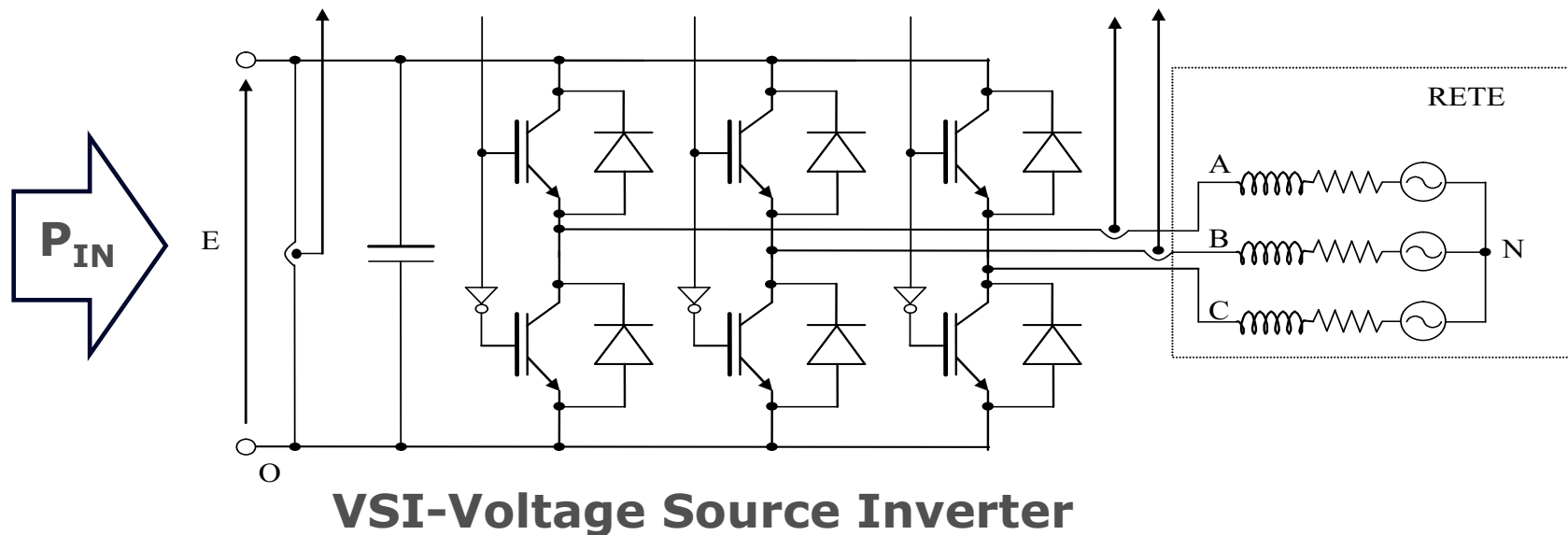


## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

#### Interfacciamento con la rete

L'interfacciamento con la rete di una sorgente in corrente continua, richiede l'utilizzo di un inverter.

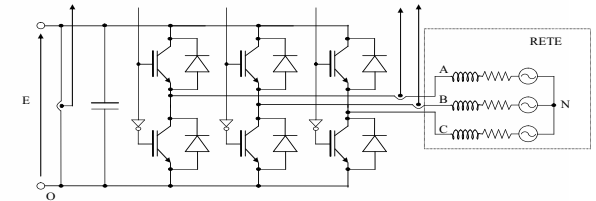




## 2. Conversione elettromeccanica

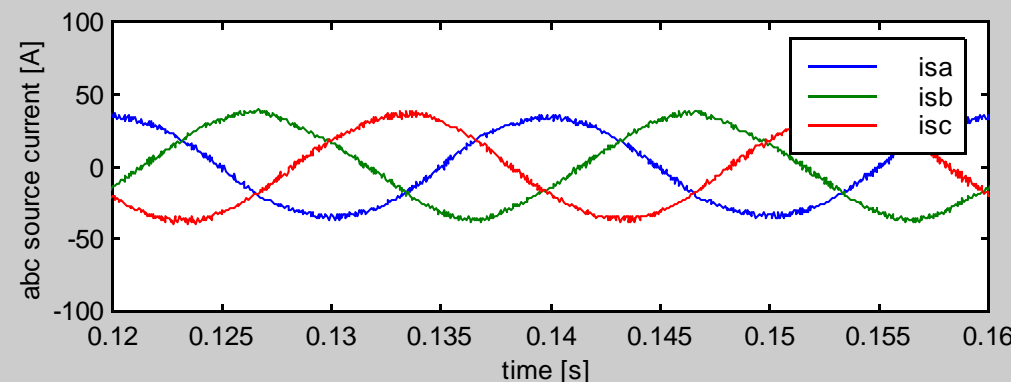
### Convertitori elettronici

#### Interfacciamento con la rete



1. L'inverter deve essere controllato in modo da trasferire in rete tutta la potenza in arrivo sul lato DC. Non è possibile accumulare energia
2. L'inverter inietta in rete correnti 'sinusoidali' con un ripple ad alta frequenza

Il controllo sull'inverter 'lato rete' consente di controllare la tensione di bus DC

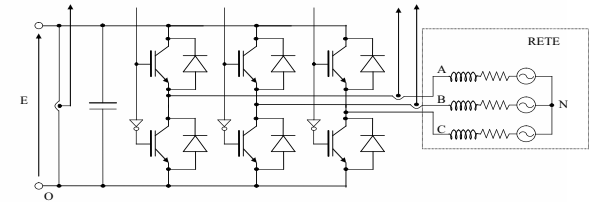




## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

### Interfacciamento con la rete



**L'inverter lato rete deve rispettare la normativa vigente per l'interfacciamento con la rete dei sistemi di generazione . In particolare deve eseguire precise funzionalità in caso di guasto sull'inverter e sulla rete**

**Ad esempio:**

- 1. Non deve alimentare la rete in caso di interruzione della alimentazione di rete**
- 2. Deve continuare ad erogare corrente anche in caso di rete distorta**

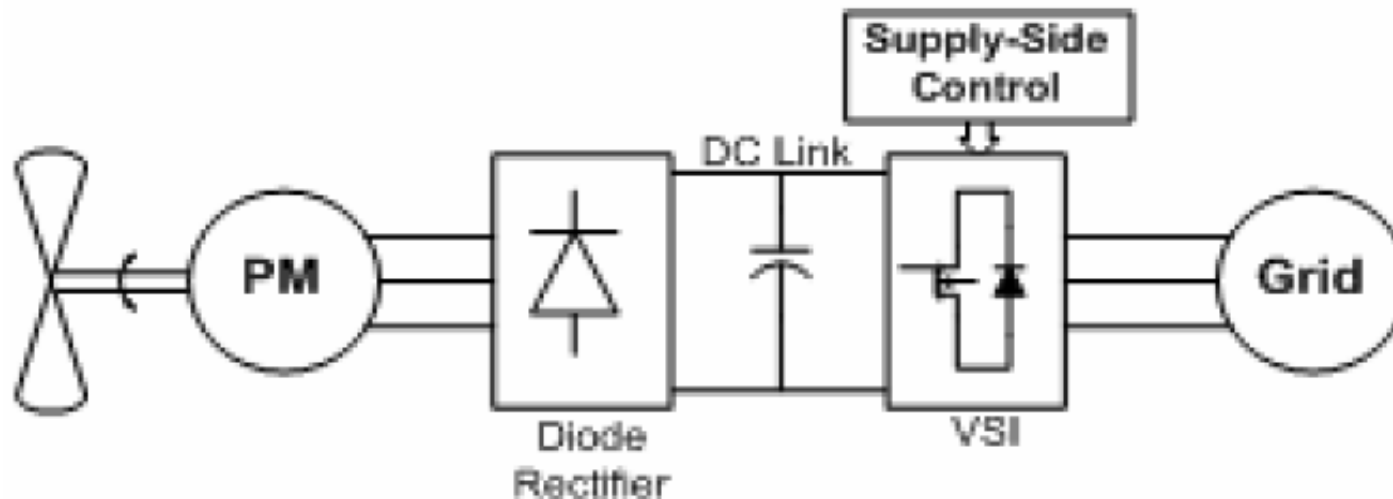


## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

Per macchine sincrone (MP)-

MP1 Schema con ponte raddrizzatore non controllato

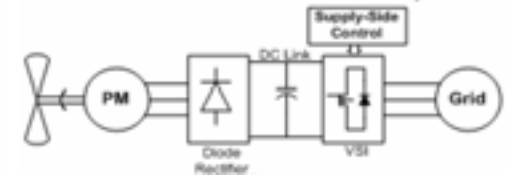




## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

#### Sistemi per macchine sincrone



#### MP1 Schema con ponte raddrizzatore non controllato

#### CARATTERISTICHE

In schemi molto semplici si tiene la  $V_{DC} = \text{cost}$ , il controllo della potenza non è ottimale.

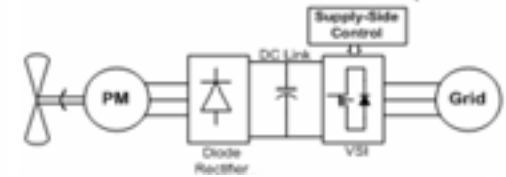
Controllando la  $V_{DC}$  con l'inverter 'lato rete' è possibile controllare la corrente erogata dalla macchina e quindi la sua coppia. Si possono così implementare tecniche di ricerca del punto di massimo della potenza (MPPT-Maximum Power Point tracking)



## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

#### Sistemi per macchine sincrone



#### MP1 Schema con ponte raddrizzatore non controllato

#### CARATTERISTICHE

- È il sistema più semplice e dalle prestazioni meno soddisfacenti
- Utilizzabile in un range ristretto di velocità di rotazione e quindi di vento
- **Molto economico**

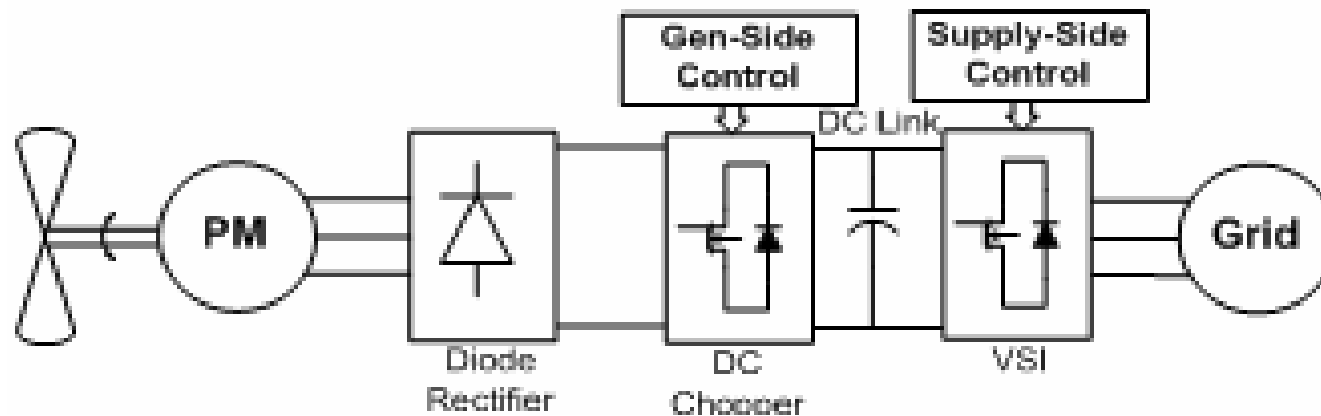


## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

#### Sistemi per macchine sincrone

MP2 Schema con ponte raddrizzatore e chopper DC/DC innalzatore (*boost*)

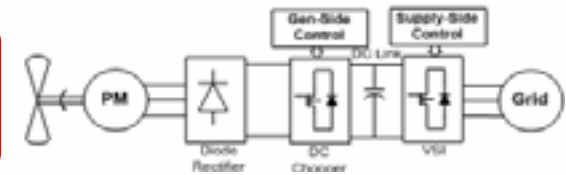




## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

#### Sistemi per macchine sincrone



MP2 Schema con ponte raddrizzatore e chopper DC/DC innalzatore (*boost*)

#### CARATTERISTICHE

La  $V_{DC}$  dell'inverter 'lato rete' è indipendente dalla tensione di controllo della macchina elettrica

Utilizzando il chopper è possibile controllare al corrente erogata dal generatore e quindi la sua coppia resistente su un più ampio range di velocità di rotazione e quindi di vento

E' adatto ad essere integrato con batterie collegate sulla  $V_{DC}$



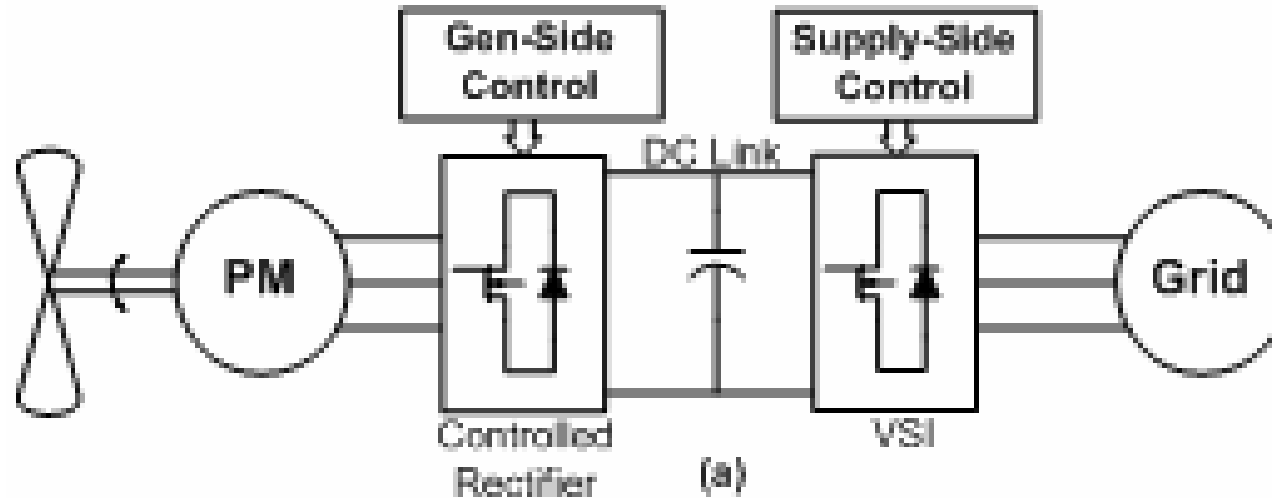


## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

### Sistemi per macchine sincrone

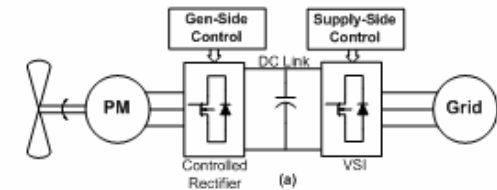
#### MP3 Schema a doppio inverter



## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

### Sistemi per macchine sincrone



### MP3 Schema a doppio inverter

#### CARATTERISTICHE

E' lo schema che consente il controllo ottimale del generatore

E' possibile controllare direttamente la corrente del generatore e quindi la sua coppia in ogni sua condizione di funzionamento

Dal controllo di coppia si passa al controllo di velocità e quindi ci si posiziona nel punto di lavoro desiderato: (Potenza massima o velocità massima)

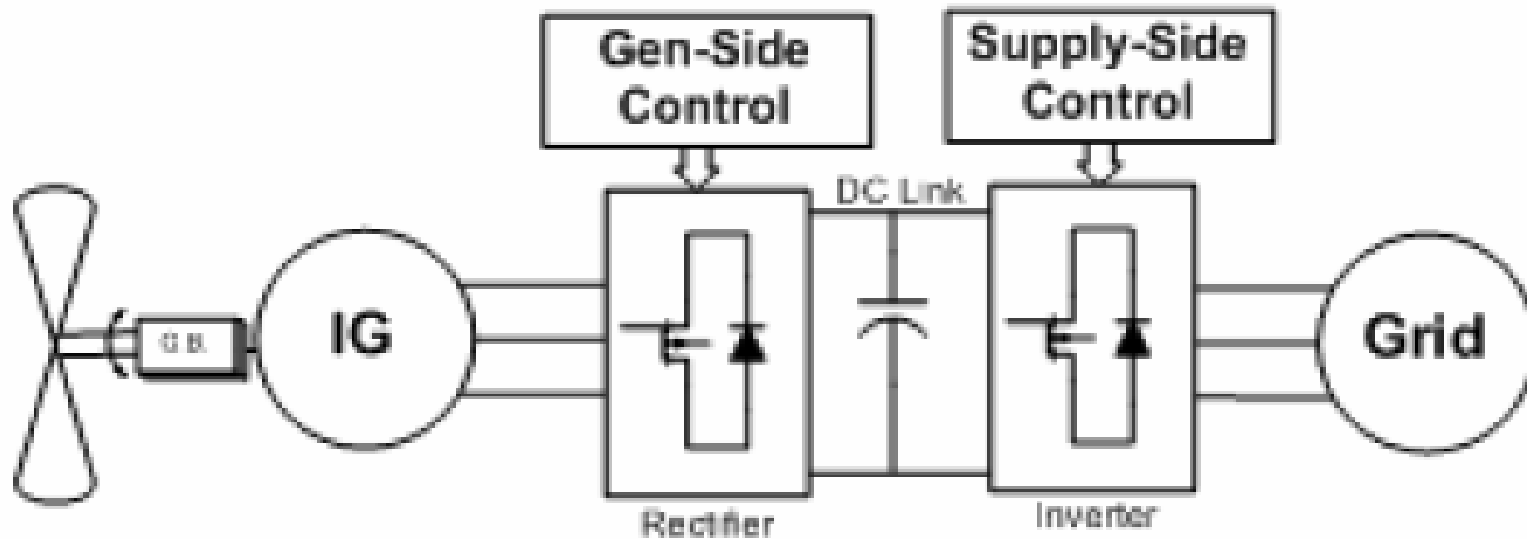


## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

Sistemi per macchine asincrone a gabbia

MA1 Schema con doppio inverter sullo statore



... stesse caratteristiche del sincro MP3

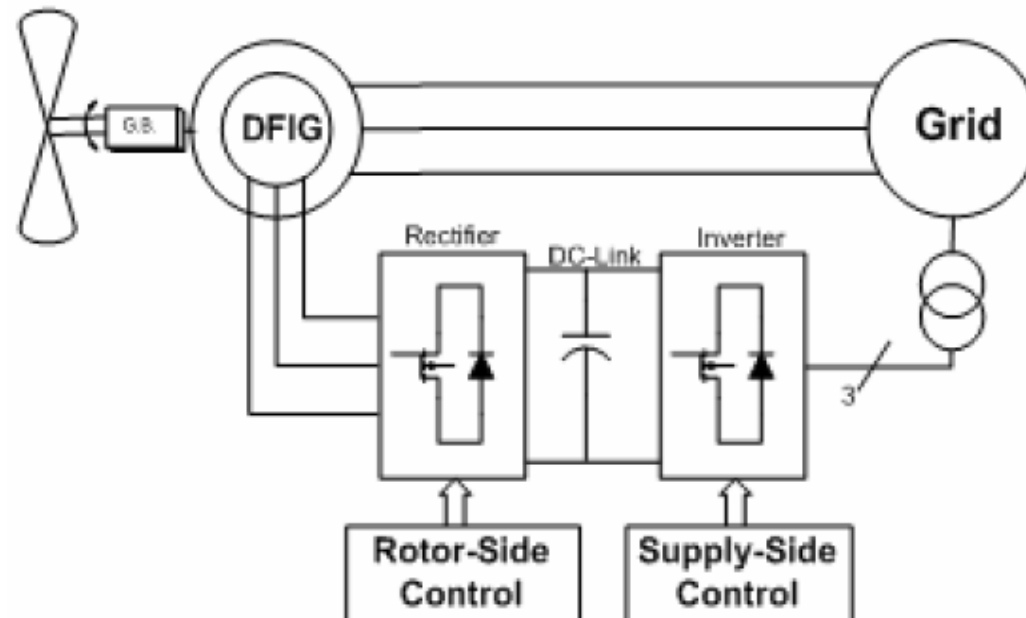


## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

Sistemi per macchine asincrone a rotore avvolto

MA2 Schema con doppio inverter sul rotore





## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

Sistemi per macchine asincrone a rotore avvolto

MA2 Schema con doppio inverter sul rotore

#### CARATTERISTICHE

E' lo schema che consente di ridurre il dimensionamento e quindi il **COSTO** del convertitore elettronico

Normalmente il convertitore è dimensionato per il 30% della potenza, consentendo di controllare la velocità del generatore nel range 50% ÷ 100%.

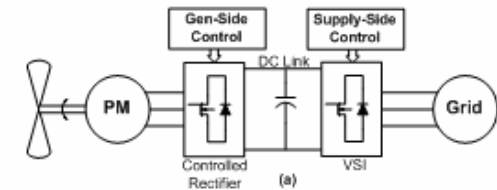
E' lo **schema più utilizzato** negli aerogeneratori di grande potenza



## 2. Conversione elettromeccanica

### Convertitori elettronici

### Sistemi per macchine sincrone



### MP3 Schema a doppio inverter

#### CARATTERISTICHE

E' lo schema più costoso poiché prevede la conversione 'full power' della potenza su due stadi AC/DC e DC/AC

È utilizzato su tutte le fasce di potenza kW÷MW

**Grazie per l'attenzione**

[www.die.unibo.it](http://www.die.unibo.it)  
[www.elettrica.ing.unibo.it](http://www.elettrica.ing.unibo.it)



Generazione eolica