

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale
«Stato dell'arte nella trazione
elettrica ferroviaria»***

Tutor universitario: *Prof. Piergiorgio Sonato*

Laureando: *Alessio Miron*

Padova, 20/11/2023

Gli obiettivi principali di questo lavoro sono:

- Delineare le principali caratteristiche richieste dalle applicazioni ferroviarie più comuni nei confronti dei sistemi di trazione elettrica ferroviaria;
- Dettagliare le soluzioni più diffuse nell'industria ferroviaria sul piano di come possono adempiere alle richieste poste dalle applicazioni sopra delineate.

**Requisiti delle applicazioni
ferroviarie**



**Proprietà dei sistemi
costituenti il sistema di
trazione**

Usando come riferimento i requisiti definiti per ciascuna applicazione ferroviaria il lettore può, studiando ogni soluzione proposta per ogni elemento del sistema di trazione, individuare quella più appropriata per la applicazione d'interesse.



Locomotive – requisiti:

- Modularità;
- Versatilità;
- Alta densità di coppia;
- Raffreddamento efficiente a diversi regimi di velocità;
- Ingombro ridotto dei diversi elementi non è un priorità.

Electric Multiple Unit (EMU) – requisiti:

- Efficienza;
- Sistema di trazione di dimensioni ridotte per massimizzare lo spazio utile;
- Silenziosità.





High Speed Train (HST) – requisiti:

- Alta densità di coppia;
- Alta efficienza a velocità molto variabili;
- Sicurezza.

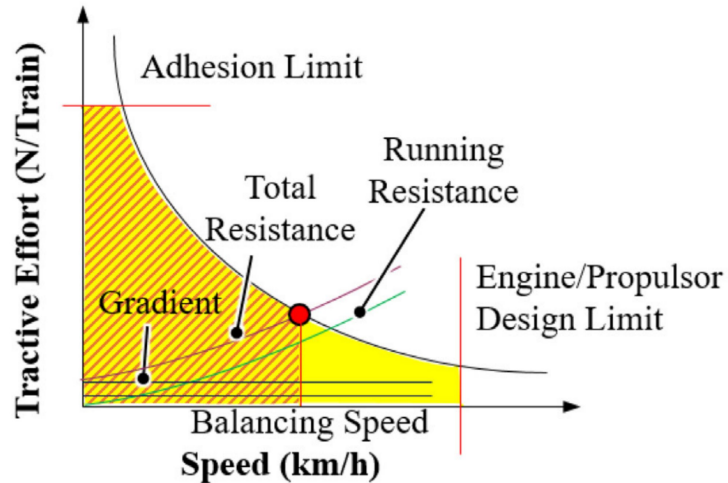
Metro & Light Rail Vehicle (LRV) – requisiti:

- Bassa densità di coppia;
- Peso e dimensioni ridotte;
- Compattezza del sistema di trazione;
- Alto grado di automazione;
- Silenziosità.



I motori sono soggetti a requisiti specifici:

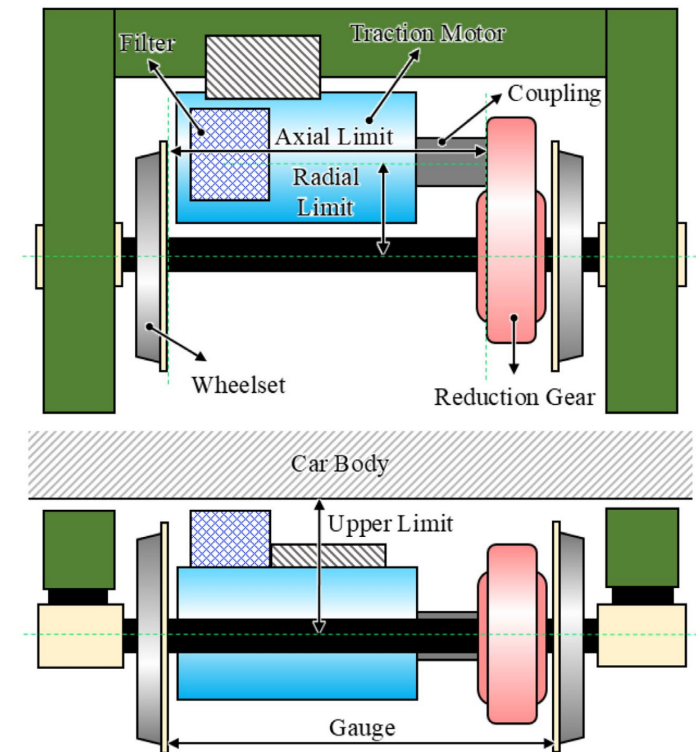
$$R = A + B \cdot v + C \cdot D \cdot v^2$$



Data una curva di resistenza totale, l'unità di trazione deve essere progettata in modo tale da garantire che il treno raggiunga la velocità massima di progetto.

- curva coppia-velocità del motore;
- rapporto di trasmissione del riduttore;

Il motore è generalmente montato nel carrello, per cui è soggetto a vincoli dimensionali stringenti.



Caratteristiche principali dei motori a induzione magnetica:

- Bassa densità di coppia;
- Costo ridotto;
- Affidabilità e sicurezza;
- Compatibilità con il *group drive*;
- Ingenti perdite nella gabbia del rotore.

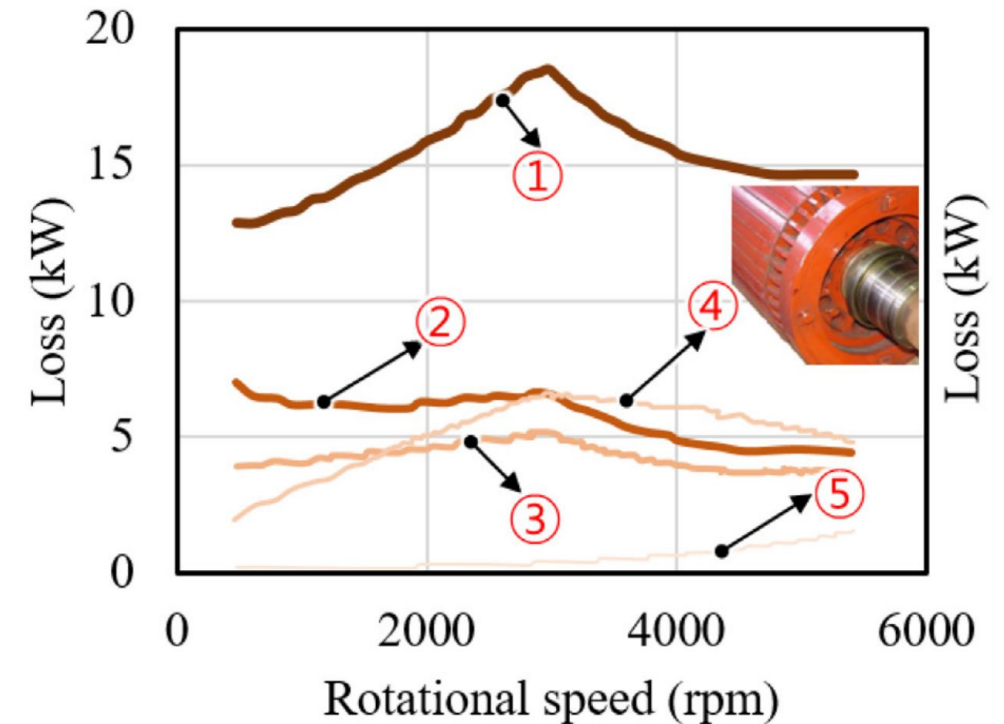
Due tipi di motori a induzione magnetica:

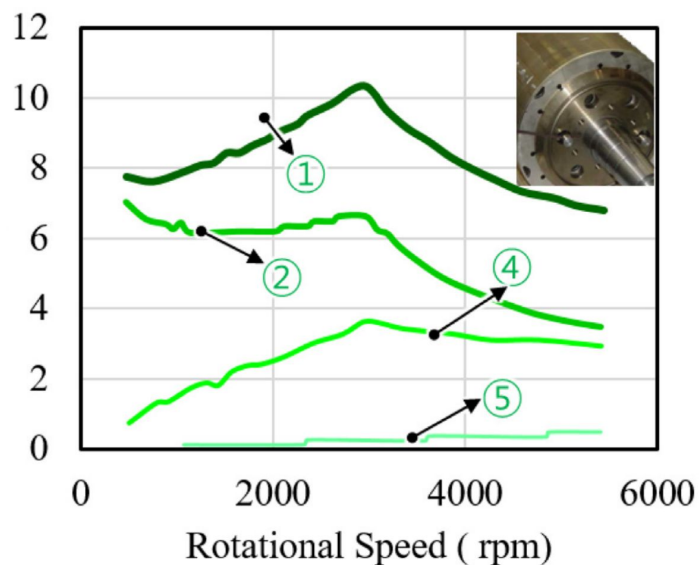
- Gabbia in Cu → più costosi ma più efficienti
- Gabbia in Al → meno costosi ma meno efficienti, meglio compatibili con *group drive*.

$$\eta = 90\% \sim 93\%$$

I motori a induzione magnetica sono attualmente i più utilizzati.

① perdite totali; ② perdite nel rame dello statore; ③ perdite nel rame del rotore; ④ perdite nel ferro; ⑤ perdite per attrito meccanico.



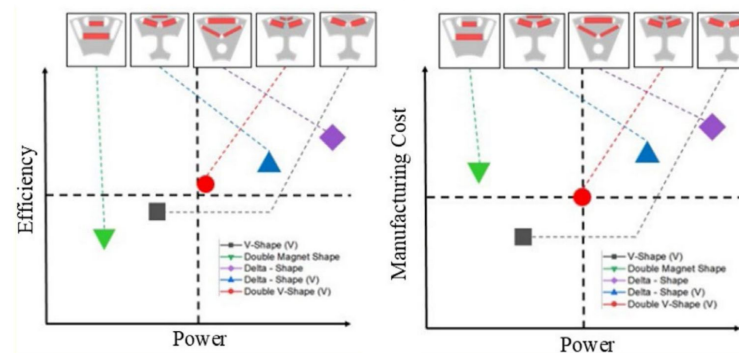


① perdite totali; ② perdite nel rame dello statore; ③ perdite nel rame del rotore; ④ perdite nel ferro; ⑤ perdite per attrito meccanico.

$$\eta = 97\% \sim 99\%$$

Caratteristiche principali dei motori a magneti permanenti:

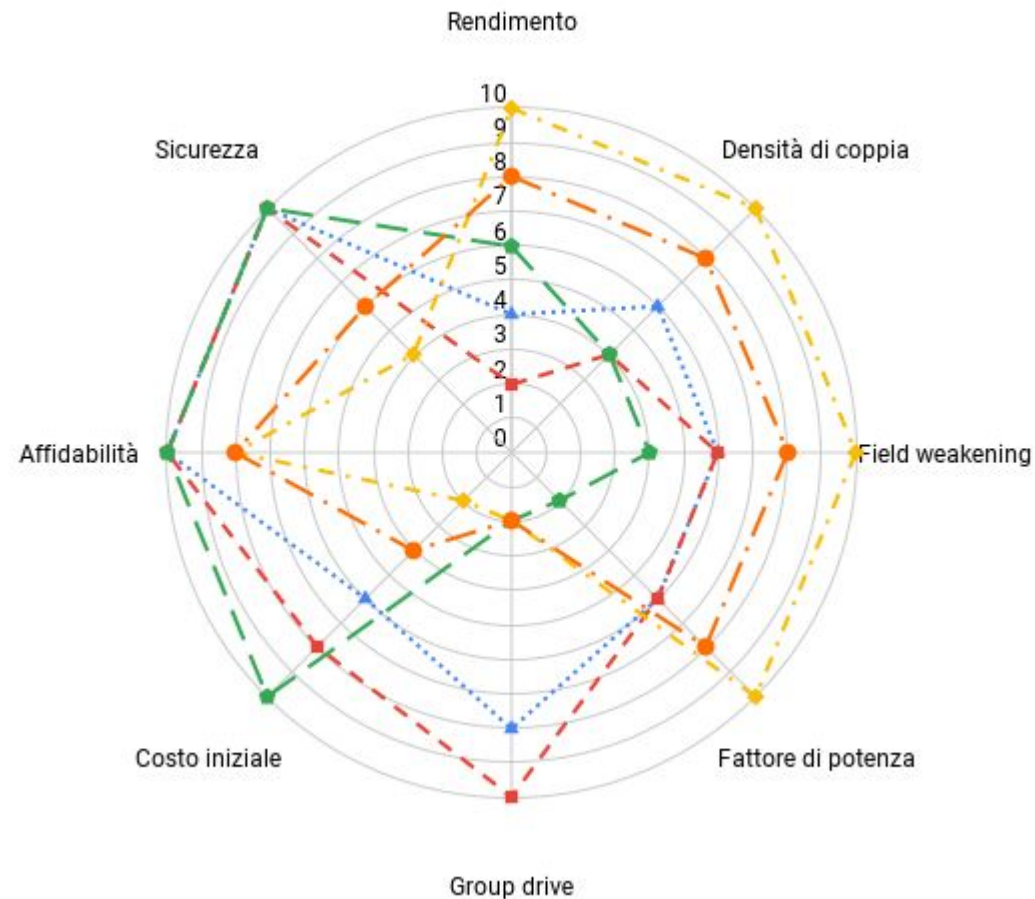
- Sincroni, facilmente controllabili;
- Alta efficienza;
- Alta densità di coppia;
- Non compatibili con il *group drive*;
- Alto costo indotto dalla presenza dei magneti permanenti.



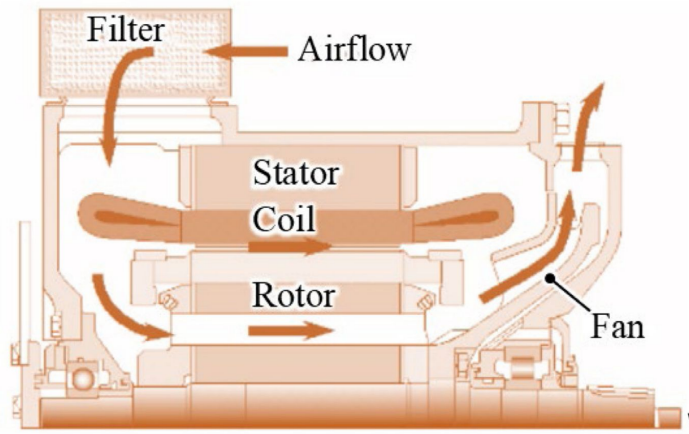
La disposizione dei magneti nel rotore e il loro volume complessivo influenza pesantemente il rendimento, densità di coppia e costo del motore.

I motori a magneti permanenti stanno gradualmente entrando in uso.

▲ IM, Cu ■ IM, Al ◆ PM ◆ SynRM ● PMaSynRM



- i motori IM sono i più affidabili ed economici, presenza consolidata nell'industria ferroviaria;
- I motori PM sono più efficienti, più potenti e più versatili, ma allo stesso tempo sono meno affidabili, sicuri, e vastamente più costosi. Rappresentano la nuova generazione di motori di trazione ferroviaria;
- I motori SynRM sono economici, affidabili e sicuri, ma sono poco potenti e inefficienti, non sono popolari per applicazioni ferroviarie;
- I motori PMaSynRM sono una soluzione ibrida tra PM e SynRM, offrendo potenza ed efficienza intermedia a costo molto ridotto.



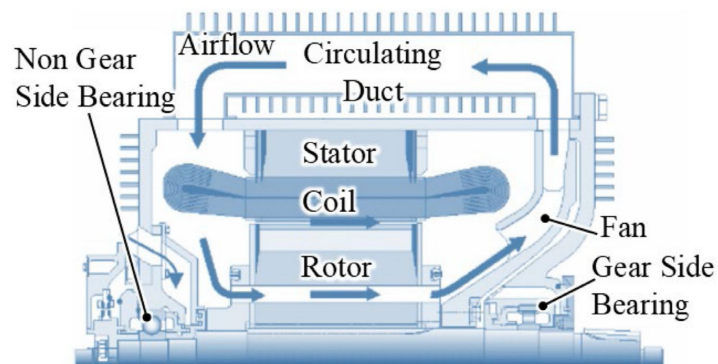
Autoventilazione a circuito aperto

Ventilazione forzata a circuito aperto:

- Introduce aria esterna → rischio di occlusione;
- Regime indipendente dalla velocità del motore;
- Ingombrante.

Autoventilazione a circuito aperto:

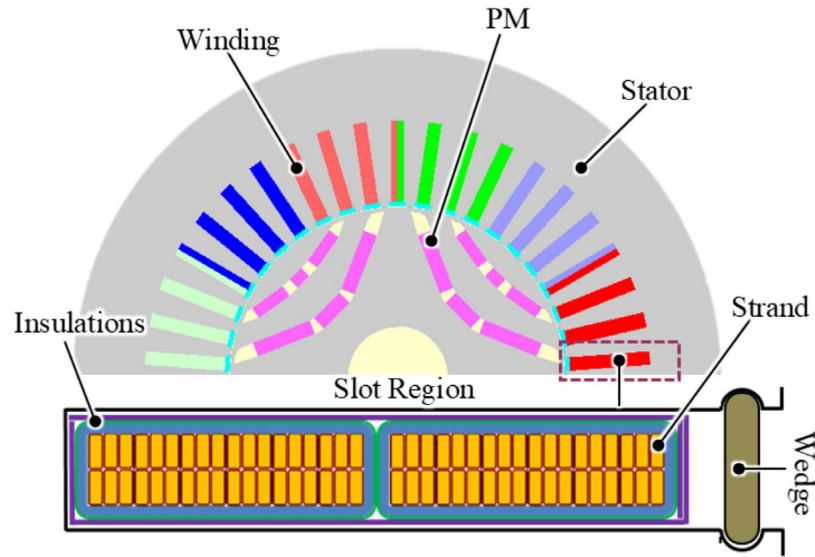
- Introduce aria esterna → rischio di occlusione;
- Regime fortemente dipendente dalla velocità del motore;
- Rumoroso;
- Molto economico;



Autoventilazione a circuito chiuso

Autoventilazione a circuito chiuso:

- Non introduce aria esterna;
- Regime fortemente dipendente dalla velocità del motore;
- Temperatura media più alta.

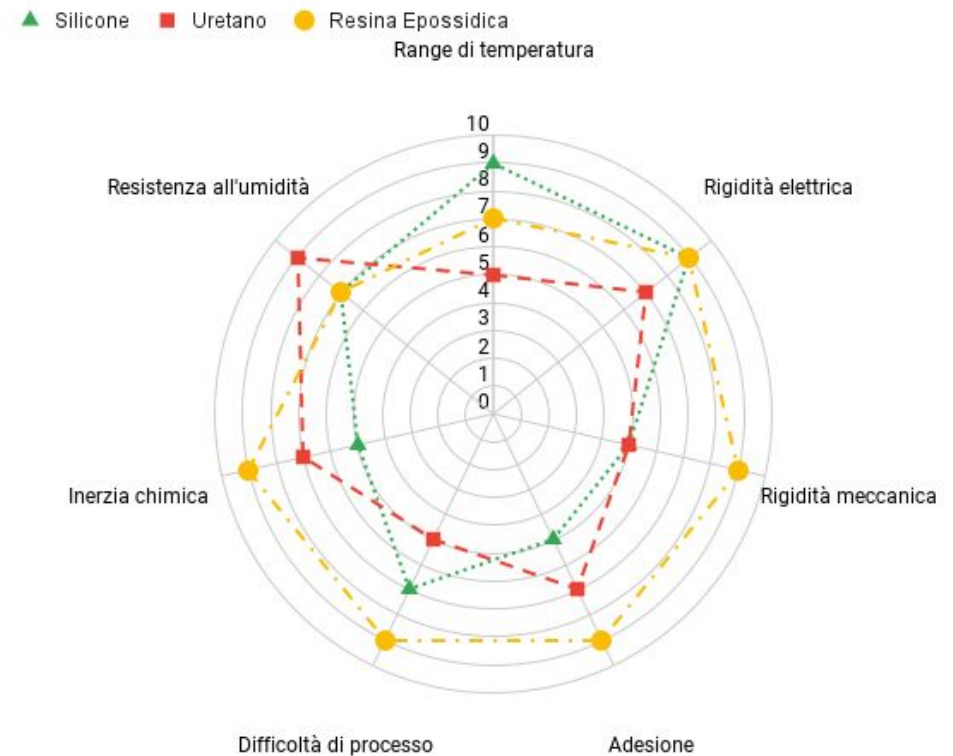


L'isolamento è effettuato con diversi strati.

- Nomex;
- Glass mica;
- Kapton.

Dopo o invece dell'isolamento spesso si effettua un incapsulamento con della resina.

- Silicone;
- Uretani;
- Resina epossidica;



La performance del convertitore limita la performance dei motori.

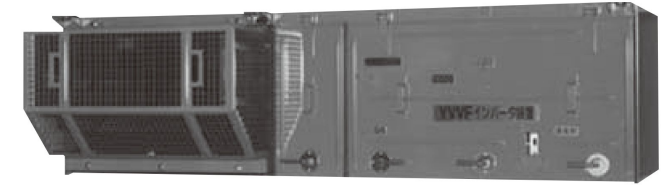
**Si,
IGBT** ⇒ **SiC,
MOSFET**

I semiconduttori a WBG sono caratterizzate da:

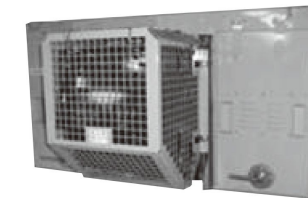
- tensione di rottura maggiore;
- minore *on-state resistance*;
- migliore conduttività termica.

Queste proprietà permettono di passare da IGBT a MOSFET, che permettono di adottare frequenze di commutazione maggiori, migliorando il rendimento dell'invertitore.

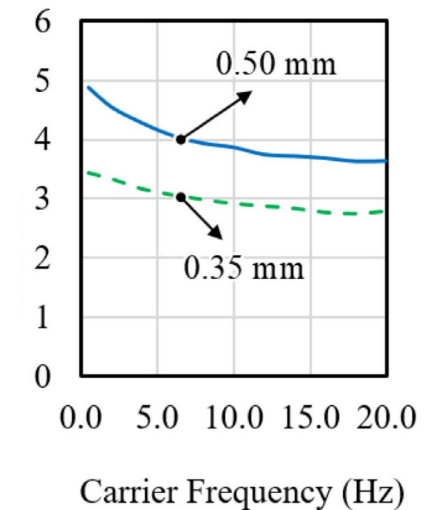
Migliore rendimento + migliore conduttività termica → minore massa e volume



(a) Previous inverter



(b) Full-SiC inverter



Due campi di applicazione dell'intelligenza artificiale:

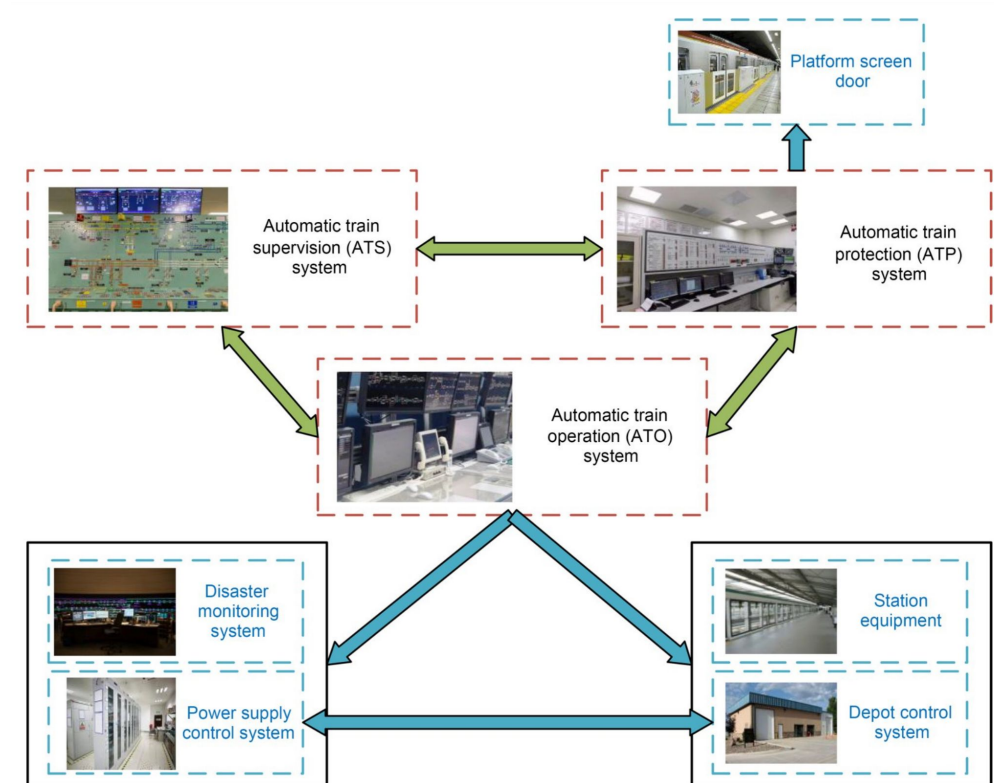
➔ Sistemi di controllo:

Sistemi di intelligenza artificiale permettono di meglio automatizzare e interconnettere i tre sistemi regolanti l'infrastruttura e il traffico ferroviario:

- *Automatic Train Protection;*
- *Automatic Train Supervision;*
- *Automatic Train Operation.*

➔ Strategia di manutenzione:

Sistemi di intelligenza artificiale possono migliorare la capacità di predizione dello stato di manutenzione e vita residua dei componenti sulla base di dati statistici e diagnostica in tempo reale, permettendo agli operatori di ottimizzare la programmazione delle operazioni di manutenzione e riparazione.

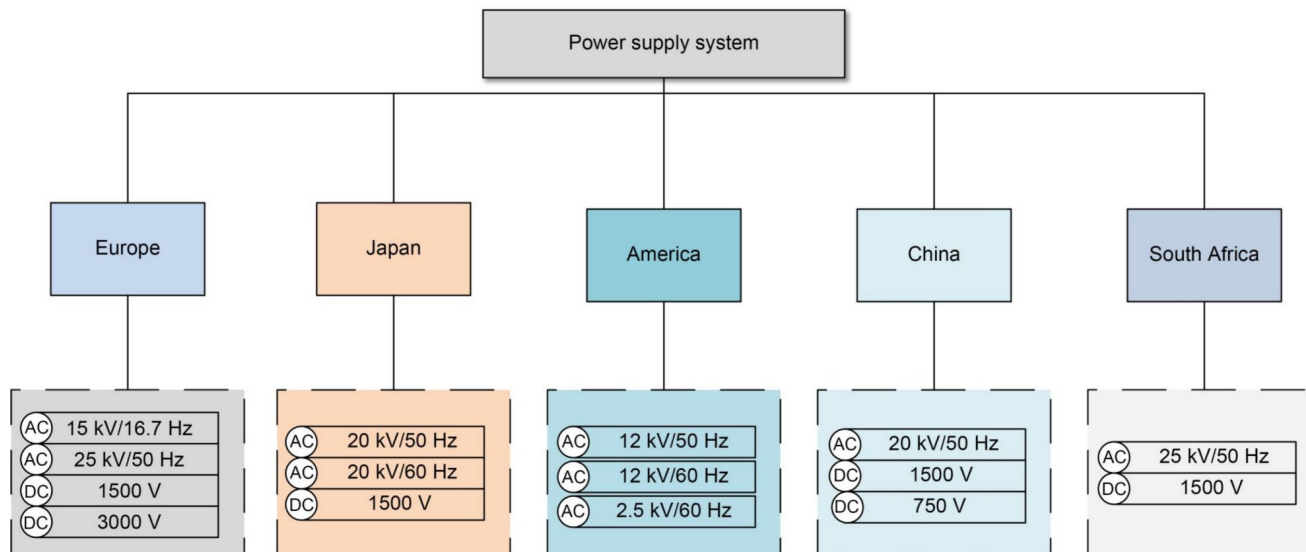


Esistono diversi piani su cui i sistemi ferroviari possono essere non compatibili:

- Scarto;
- Sagoma limite;
- Carico per asse limite;
- Eletrificazione;
- Forma della catenaria;
- Tensione e frequenza di alimentazione.

Per migliorare la compatibilità si adottano:

- Sistemi multi-modali:
 - Trazione termica + trazione elettrica;
 - Trazione termica + trazione elettrica + batteria;
- Convertitori politensione;
- Carrelli a scarto variabile.



I freni elettrodinamici normalmente restituiscono energia alla rete di distribuzione. Quando questo non è possibile, si possono adottare sistemi di immagazzinamento come:

- batterie;
- supercondensatori;
- volani.



Riduzione delle emissioni,
aumento del costo.

L'utilizzo di combustibili rinnovabili e a basso carbonio su infrastruttura non elettrificata è molto desiderabile. Le tecnologie correntemente in via di sviluppo fanno uso di:

- pile a combustibile (idrogeno);
- biocombustibili.



- I motori PM gradualmente sostituiranno i motori IM per la maggior parte delle applicazioni a causa del loro rendimento e densità di coppia maggiori;
- I sistemi di raffreddamento a circuito chiuso e a ventilazione forzata sono preferibili per la protezione che offrono al motore e le loro performance rispettivamente;
- Il potting permette di ottenere buono isolamento insieme ad una migliore conduttività termica e uno smorzamento delle vibrazioni;
- L'applicazione di elettronica di potenza utilizzando semiconduttori WBG permette di migliorare il rendimento;
- L'applicazione di tecnologie innovative come IA, sistemi di recupero di energia, fonti di energia rinnovabili e a basso carbonio e tecnologie atte a migliorare la compatibilità tra sistemi ferroviari permette migliorare il rendimento, sicurezza, affidabilità e allargare l'ambito d'applicazione di un singolo sistema ferroviario, e allo stesso tempo ridurre l'impatto ecologico che ha sull'ambiente.