

Simulatore termico per catene di trazione di treni ad alta velocità, applicazione su ETR500-Frecciarossa

*Thermal simulator for traction chains of high-speed trains,
application to ETR500-Frecciarossa*

Dott. Ing. Matteo NOBILI (*)

Dott. Ing. Salvatore RIZZO (*)

Dott. Ing. Francesco ROMANO (*)

Sommario - L'articolo, è strutturato come segue: inizialmente sono illustrati i principi teorici, nei quali si descrive l'utilizzo di reti circuituali (reti termiche) per rappresentare il comportamento termico delle macchine elettriche; nel seguito sono descritti brevemente l'architettura generale del sistema di propulsione del treno Frecciarossa ETR 500 e i sistemi di raffreddamento impiegati; nella parte centrale dell'articolo è affrontata la descrizione vera e propria dei modelli termici, inoltre, sono esposte le validazioni degli stessi, seguite da simulazioni di tratte reali percorse dal treno; infine sono esposte le conclusioni.

1. Introduzione

La progettazione degli orari di un mezzo di trazione è strettamente legata alla caratteristica di trazione del mezzo stesso e al dimensionamento termico dei componenti della catena di trazione, se da una parte l'esigenza commerciale è di minimizzare i tempi di percorrenza, dall'altra, la definizione del profilo di velocità e degli sforzi di trazione richiesti al materiale rotabile deve tenere conto anche della necessità di non ridurre la vita utile di componenti fondamentali, quali ad esempio motore di trazione, convertitore di trazione e trasformatore di trazione. Se nel passato il dimensionamento della catena di trazione era riferito a valori di potenza continuativa, oraria o semioraria, nei mezzi di trazione moderni, in particolare nei treni ad alta velocità, il dimensionamento termico dei componenti della catena di trazione, anche per motivi di ottimizzazione sia dei costi che dei pesi, è effettuato generalmente in riferimento agli specifici profili di missione, definiti per i servizi commerciali previsti dal cliente in

Summary - The article is structured as follows: it initially shows the theoretical principles, describing the use of circuit networks (thermal networks) to represent the thermal behaviour of electrical machines; the overall architecture of the Frecciarossa ETR 500 train propulsion system and the cooling systems used are then described briefly; the central part of the article addresses the real description of thermal models and explains validations of the same, followed by simulations of real routes travelled by the train; the conclusions are finally presented.

1. Introduction

The time scheduling of a traction means is closely linked to the traction characteristic of the means itself and the thermal sizing of the components of the traction chain, whilst the commercial requirement is to minimize travel times, on the other hand, the definition of the speed profile and traction effort demanded to rolling stock must also take account of the need not to reduce the useful life of key components such as traction engine, traction converter and traction transformer. If in the past the sizing of the traction chain was referred to continuative power values, hourly or half-hourly intervals, in modern traction means, particularly in high-speed trains, thermal sizing of the components of the traction chain, even for reasons of both cost optimisation and of weights, is generally made with respect to the specific mission profiles, defined for the business services provided by the customer at the time of purchase of the rolling stock. With these sizing criteria the result is that, in the area of constant power of the traction characteristic, the traction chain components gener-

(*) Tecnologie Elettriche ed Elettroniche, Ingegneria Rotabili e Tecnologie di Base, Direzione Tecnica, Trenitalia SpA.

(*) *Tecnologie Elettriche ed Elettroniche, Ingegneria Rotabili e Tecnologie di Base, Direzione Tecnica, Trenitalia SpA.*

SCIENZA E TECNICA

fase di acquisto del rotabile. Con tali criteri di dimensionamento si ha che, nella zona a potenza costante della caratteristica di trazione, i componenti della catena di trazione lavorano generalmente in regime di sovraccarico⁽¹⁾. Se il funzionamento in sovraccarico, nell'effettuazione dei servizi commerciali previsti dal profilo di missione definito, è comunque progettato in modo tale da garantire la durata di vita del componente, sorge l'esigenza di verificarne l'impatto nel programmare i regimi di funzionamento del treno anche per nuovi scenari di esercizio, su tratte differenti o per servizi differenti (es. servizi navetta, servizi no-stop a lunga percorrenza, etc.) da quelli previsti dal profilo di missione originario. La valutazione del giusto compromesso fra tempi di percorrenza, sollecitazioni termiche e durata di vita dei principali componenti della catena di trazione, richiede l'utilizzo di un simulatore che, oltre al calcolo degli orari, consenta di riprodurre in maniera realistica il comportamento termico della catena di trazione durante il funzionamento del treno. Lo scopo dell'articolo è quello di illustrare un metodo valido per la realizzazione di modelli termici dei principali componenti della catena di trazione dei treni Frecciarossa ETR 500, in particolare: motore di trazione, inverter, convertitore relativo al 1° stadio di conversione e trasformatore di trazione. Nella realizzazione di ogni singolo modello è stato seguito tale procedimento:

- realizzazione della rete termica;
- implementazione di un metodo di calcolo delle perdite nelle varie parti attive dell'apparecchiatura, oggetto del modello;
- implementazione di sottosistemi che consentono al modello di interfacciarsi con le variabili in input, fornite dal software "simulatore di tratta";
- esecuzione di simulazioni finalizzate a confermare la validità del modello realizzato.

2. Principi teorici sulla trasmissione del calore

2.1. Generalità

Le perdite nel ferro, negli avvolgimenti e quelle per attriti e ventilazione si trasformano in calore e determinano gli incrementi di temperatura delle macchine elettriche. La naturale tendenza all'equilibrio termico provoca, all'interno delle stesse, il passaggio del calore dalle parti ove è prodotto verso le superfici esterne, lambite da un fluido a contatto, a temperatura necessariamente più bassa di quella delle superfici da raffreddare. Nel periodo iniziale di funzionamento della macchina elettrica, che

ally work in overload regime⁽¹⁾. If operation in overload, in the supply of commercial services provided by the defined mission profile, is designed in such a way as to guarantee the lifetime of the component, there is the need to assess the impact in planning the train operating regimes also for new operation scenarios, on different routes or for different services (e.g. shuttle services, long distance non-stop services, etc.) than those provided for by the original mission profile. The evaluation of the right compromise between travel time, thermal stress and life span of the main components of the traction chain, requires the use of a simulator that, in addition to the calculation of the timetable, allows reproducing the thermal behaviour of the traction chain in a realistic way during train operation. The purpose of this article is to illustrate a valid method for the creation of thermal models of the main traction chain components of the ETR 500 Frecciarossa trains, in particular: traction engine, inverter, converter for the 1st conversion stage and traction transformer. The following procedure was followed in the realisation of each model:

- realisation of the thermal network;
- implementation of a calculation method of losses in the various active parts of the equipment, purpose of the model;
- implementation of subsystems that allow the model to interface with input variables, provided by the "route simulator" software;
- performance of simulations aimed at confirming the validity of the model created.

2. Theoretical principles on heat transfer

2.1. General Information

Losses in windings and iron and those for friction and ventilation are transformed into heat and cause temperature increases of electric machines. The natural inclination towards thermal equilibrium within the same, causes heat transfer from the parts where it is produced to the external surfaces, lapped by a fluid in contact, with a temperature necessarily lower than the surfaces to cool. In the initial period of operation of the electric machine with environmental temperature, only part of the heat is transferred to the fluid in contact: the rest, accumulating in the mass of the machine, determines the increasing thermal gradient between the limit areas and the fluid. Since the necessary temperature jump is achieved, all the heat produced is transferred and there are no further increases in tempera-

⁽¹⁾ I treni ad alta velocità moderni sono caratterizzati da elevate accelerazioni per cui il funzionamento dei componenti della catena di trazione in regime di sovraccarico (e nella zona a potenza costante) è comunque di durata limitata.

⁽¹⁾ Modern high-speed trains are characterised by high accelerations so the operation of the components of the traction chain in overload regime (and in the constant power area) is however of limited duration.

aveva la temperatura dell'ambiente, soltanto una parte del calore è ceduto al fluido a contatto: il resto, accumulandosi nella massa della macchina, determina il crescente dislivello termico fra le superfici limiti e il fluido. Raggiunto il necessario salto di temperatura, tutto il calore prodotto è ceduto e non si verificano ulteriori aumenti di temperatura nella macchina, la quale ha raggiunto il regime termico. Ogni qual volta varia uno dei fattori dell'equilibrio termico (perdite, temperatura e portata del fluido a contatto, temperatura ambiente) si determina un fenomeno termico transitorio.

2.2. Reti termiche (in regime stazionario)

Le macchine elettriche sono costituite da materiali attivi, in cui si genera energia termica, e da materiali inerti. Se una parte attiva possiede superfici terminali diversamente raffreddate, e quindi a temperature disuguali, si stabilisce un flusso termico interno. Le pareti inerti attraversate dal flusso termico sono principalmente i materiali isolanti e le superfici strutturali lambite dal fluido a contatto. Il comportamento termico delle macchine elettriche può essere esplorato costruendo degli schemi di reti analoghe a quelle elettriche. Una rete termica contiene delle sorgenti di calore (P_a, P_b, \dots) e delle resistenze termiche (R_1, R_2, \dots). La resistenza termica " R_n " attraversata dal flusso termico di potenza " P_n ", determina la caduta di temperatura $\Theta_n = R_n P_n$. Alla rete termica si applicano le seguenti regole (a regime):

1. è nulla la somma algebrica delle potenze termiche di un nodo;
2. la somma delle potenze termiche generate è uguale alla somma delle potenze termiche emesse dalle superfici di raffreddamento;
3. la temperatura in un punto è la stessa qualunque sia la via che si percorre per raggiungerlo.

Per maggior generalità, si deve ritenere che le temperature del fluido refrigerante che lambisce le superfici emittenti siano localmente diverse. Un esempio di rete termica in regime stazionario è rappresentato in fig. 1.

Si ha una rete termica con tre sorgenti di calore P_a, P_b e P_c , con quattro superfici emittenti, e quindi quattro resistenze di emissione e cinque resistenze di conduzione. Le sorgenti sono rappresentate da cerchi, le resistenze di conduzione da rettangoli e le resistenze di emissione da segmenti in grassetto. Le quattro superfici di emissione raggiungono le sovratemperature di $\Theta_2, \Theta_3, \Theta_5$ e Θ_8 rispetto al fluido refrigerante.

Si ha:

- $\Theta_2 = R_2 P_2$;
- $\Theta_3 = R_3 P_3$;
- $\Theta_5 = R_5 P_5$;
- $\Theta_8 = R_8 P_8$.

ture in the machine, which has reached thermal regime. Whenever one of thermal equilibrium factors varies (losses, temperature and fluid in contact flow, ambient temperature) a thermal transient phenomenon is produced.

2.2. Thermal networks (in stationary regime)

Electrical machines consist of active materials and inert materials, in which heat generates,. If an active part has terminal surfaces otherwise cooled and therefore unequal temperatures, an internal heat flow is established. Inert walls crossed by heat flow are mainly insulating materials and structural surfaces lapped by contact fluid. The thermal behaviour of electrical machines can be explored by constructing networks schemes similar to electric ones. A thermal network contains heat sources (P_a, P_b, \dots) and thermal resistances (R_1, R_2, \dots). Thermal resistance " R_n " crossed by thermal power flow " P_n ", determines the temperature fall $\Theta_n = R_n P_n$. The following rules apply to the thermal network (in steady state condition):

1. *the algebraic sum of the thermal powers of a node is zero value;*
2. *the sum of thermal powers generated equals the sum of the thermal powers emitted by the cooling surfaces;*
3. *the temperature at a point is the same whatever the path travelled to reach it.*

More generally, we should consider that the temperatures of the refrigerant fluid that laps the emitting surfaces are locally different. Fig. 1 shows an example of a steady-state thermal network.

We have a thermal network with three heat sources P_a, P_b and P_c with four emission surfaces and therefore four emission resistances and five conduction resistances. The sources are represented by circles, conduction resistances by rectangles and emission resistances by segments in bold. The four emission areas reach overtemperatures of $\Theta_2, \Theta_3, \Theta_5$ and Θ_8 compared to the refrigerant fluid.

The result is:

- $\Theta_2 = R_2 P_2$;

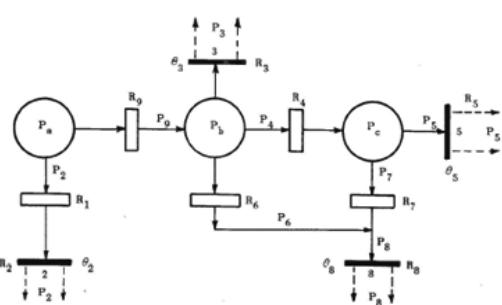


Fig. 1 - Generico esempio di rete termica a regime.
Fig. 1 - Generic example of thermal network in steady state conditions.

SCIENZA E TECNICA

2.3. Resistenze termiche

La resistenza termica di conduzione di una parete di macchina inerte è espressa dalla seguente relazione:

$$R = \frac{l}{\lambda A} [\text{K/W}]$$

dove "l" è lo spessore della parete espresso in metri, " λ " è la conducibilità termica espressa in Watt/metro*Kelvin, "A" è la sezione della parete attraversata dal flusso di calore, espressa in metri quadrati. La "R" perciò, è espressa in Kelvin/Watt. Le resistenze in serie (attraversate dallo stesso flusso) si sommano; ugualmente si sommano le conduttanze in parallelo (soggette alle stesse differenze di temperatura). Le resistenze di emissione hanno la forma:

$$R = \frac{1}{\alpha A} [\text{K/W}]$$

includendo in "α" sia il fattore di convezione " α_c " che quello di irraggiamento " α_i ". "A" è l'area della superficie emittente. La contemporanea emissione per convezione e per irraggiamento è rappresentata, nella rete, da due resistenze in parallelo. La resistenza totale di emissione è:

$$R = \frac{1}{(\alpha_c + \alpha_i)A} [\text{K/W}]$$

Nel caso, assai frequente, in cui l'area " A_c " della superficie interessata dalla convezione è diversa da quella interessata all'irradiazione " A_i ", la resistenza complessiva di emissione della parete considerata è:

$$R = \frac{1}{\alpha_c A_c + \alpha_i A_i} [\text{K/W}]$$

Una resistenza di conduzione attraverso una superficie "A" in serie con una di convezione sulla stessa superficie, determina la resistenza risultante "R", che è la somma delle due:

$$R = \frac{1}{A} \left(\frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c} \right) [\text{K/W}]$$

essendo "l" e " λ " rispettivamente lo spessore e la conducibilità termica dell'isolamento, " α_c " il fattore di convezione ed "A" l'area della comune superficie [m^2].

2.4. Fenomeni termici transitori

Si verifica un fenomeno termico transitorio quando le perdite prodotte differiscono dalla quantità di calore emesso in 1 secondo. Supponiamo che i materiali che costituiscono la macchina abbiano conduttività termiche infinitamente grandi, tali da poter ritenere che tutti i punti della stessa siano alla stessa temperatura. Tale ipotesi identifica le macchine a dei corpi omogenei, e ciò semplifica notevolmente la trattazione dei fenomeni termici transitori. Indichiamo con:

- P: le perdite totali, in W;
- A: la somma delle aree di tutte le superfici emittenti in m^2 ;
- α : il coefficiente totale di emissione (convezione ed irradiazione), in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, relativo alle superfici di area A;

- $\Theta_3 = R_3 P_s$;
- $\Theta_5 = R_5 P_s$;
- $\Theta_8 = R_8 P_s$.

2.3. Thermal resistances

The thermal conduction resistance of a wall of an inert machine is expressed by the following formula:

$$R = \frac{l}{\lambda A} [\text{K/W}]$$

where "l" is the wall thickness expressed in metres, " λ " is the thermal conductivity, expressed in Watts per metre *Kelvin, "A" is the section of the wall crossed by the heat flow, expressed in square metres.

"R" is therefore, is expressed in Kelvin/Watt. Series resistances (crossed by the same flow) are cumulative; parallel conductances are also summed (subject to the same temperature differences). Emission resistances have the form:

$$R = \frac{1}{\alpha A} [\text{K/W}]$$

including in "α" both the convection factor " α_c " and the radiation one " α_i ". "A" is the area of the emission surface. The simultaneous emission by radiation and convection is represented by two parallel strengths in the network. The total emission strength is:

$$R = \frac{1}{(\alpha_c + \alpha_i)A} [\text{K/W}]$$

In the very frequent case where the " A_c " area of the surface affected by convection is different from the one affected by radiation " A_i ", the overall emission strength of the wall considered is:

$$R = \frac{1}{\alpha_c A_c + \alpha_i A_i} [\text{K/W}]$$

A conduction resistance through a series area "A" with convection on the same surface, determines the resulting resistance "R", which is the sum of the two:

$$R = \frac{1}{A} \left(\frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c} \right) [\text{K/W}]$$

being "l" and " λ " respectively the thickness and thermal conductivity of the insulation, " α_c " the convection factor and "A" the common surface area [m^2].

2.4. Transient thermal phenomena

There is a thermal transient phenomenon when the losses produced differ by the amount of heat emitted in 1 second. Let us assume that the materials constituting the machine have infinitely large thermal conductivity, such as to believe that all the points of the same are at the same temperature. This hypothesis identifies machines as homogeneous bodies, and this greatly simplifies the dissertation

SCIENZA E TECNICA

- C : la capacità termica della macchina, cioè la quantità di calore necessaria per elevarne di 1°C la temperatura; C è espressa in J/K ;
- Θ_2 : la temperatura assoluta dell'ambiente (o del fluido refrigerante), espressa in $^{\circ}\text{C}$;
- t : il tempo, in secondi;
- Θ : la sovratemperatura istantanea, rispetto all'ambiente, delle superfici emittenti (e quindi, per le ipotesi fatte, di tutta la macchina), in K ;
- Θ_r : la sovratemperatura a regime della macchina, in K .

Si raggiunge il regime termico quando si verifica la seguente condizione:

$$P = \alpha A \Theta_r \quad (1)$$

cioè quando, come si è detto, le perdite sono uguali alla quantità di calore emesso in 1 secondo. Se l'emissione è nulla (perché $\alpha = 0$), le perdite P sono totalmente accumulate nella macchina, che nel tempo t raggiunge la sovratemperatura Θ :

$$\Theta = \frac{P}{C} t$$

Trattasi della pura accumulazione termica. Poniamo:

$$T = \frac{C\Theta_r}{P} = \frac{C}{\alpha A} \quad (2)$$

essendo "T" la costante di tempo, cioè il periodo di tempo necessario perché la macchina, in fase di pura accumulazione termica, raggiunga la sovratemperatura di regime " Θ_r ". La costante di tempo è tanto più piccola quanto più efficace è il raffreddamento e quanto minore è la capacità termica. Poiché è $\alpha \neq 0$, durante il transitorio si verificherà contemporaneamente un accumulo di calore, ed una emissione (nel presupposto che l'ambiente sia a temperatura più bassa di quella della macchina). Si potrà scrivere la seguente equazione differenziale:

$$Pdt = Cd\Theta + \alpha A \Theta dt$$

dividendo ambo i membri per " αA " e tenendo conto delle equazioni (1) e (2) si ottiene:

$$(1/T)(\Theta_r - \Theta)dt = d\Theta, \text{cioè:}$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_r - \Theta}{T}$$

Separando le variabili e integrando otteniamo:

$$t = -T \ln(\Theta_r - \Theta) + C_1 \quad (3)$$

La costante di integrazione " C_1 " è determinata dalle condizioni ai limiti; se al tempo $t = t_0$ la macchina ha la sovratemperatura " Θ_0 ", la costante di integrazione è:

$$C_1 = t_0 + T \ln(\Theta_r - \Theta_0)$$

Più spesso, all'inizio del periodo transitorio ($t=0$), la macchina è a temperatura ambiente, cioè a sovratemperatura $\Theta_0 = 0$; in tali casi si ha:

$$C_1 = T \ln \Theta_r$$

of transient thermal phenomena. The following indications are used:

- P : total losses, in W ;
- A : the sum of the areas of all emission surfaces in m^2 ;
- α : the total emission coefficient (convection and irradiation), $\text{W/m}^2\text{K}$, relating to the surfaces of area A ;
- C : the thermal capacity of the machine, i.e. the amount of heat required to raise the temperature by 1°C ; C is expressed in J/K ;
- Θ_2 : the absolute temperature of the environment (or refrigerant), expressed in $^{\circ}\text{C}$;
- t : the time, in seconds;
- Θ : the instantaneous overtemperature, relative to the environment, of emission surfaces (and therefore for the assumptions made, of the whole machine), in K ;
- Θ_r : overtemperature in steady state conditions of the machine, in K .

Thermal regime is reached when the following condition occurs:

$$P = \alpha A \Theta_r \quad (1)$$

that is when, as said, the losses are equal to the amount of heat emitted in 1 second. If the emission is null (because $\alpha = 0$), P losses are totally accumulated in the machine, which in time t reaches the overtemperature Θ :

$$\Theta = \frac{P}{C} t$$

It is pure heat accumulation. Let us assume:

$$T = \frac{C\Theta_r}{P} = \frac{C}{\alpha A} \quad (2)$$

being "T" the time constant, i.e. the period of time needed for the machine, in the pure thermal accumulation phase, to reach the regime overtemperature " Θ_r ". The time constant is as much smaller as the more effective is the cooling and the smaller the heat capacity is. Since $\alpha \neq 0$, during the transient, accumulation of heat will occur simultaneously with an emission (in the assumption that the environment is at a temperature lower than that of the machine). We can write the following differential equation:

$$Pdt = Cd\Theta + \alpha A \Theta dt$$

dividing both elements by " αA " and taking into account equations (1) and (2) the result is:

$$(1/T)(\Theta_r - \Theta)dt = d\Theta, \text{cioè:}$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_r - \Theta}{T}$$

By separating the variables and integrating the result is:

$$t = -T \ln(\Theta_r - \Theta) + C_1 \quad (3)$$

The integration constant " C_1 " is determined by the limit conditions; if at time $t = t_0$ the machine has the overtemperature " Θ_0 ", the integration constant is:

SCIENZA E TECNICA

Se invece per $t=0$, la macchina ha sovratestermperatura $\Theta_0 \neq 0$, si ha:

$$C_1 = T \ln(\Theta_r - \Theta_0)$$

Con questo valore della costante la (3) diventa:

$$t = T \ln \frac{\Theta_r - \Theta_0}{\Theta_r - \Theta}$$

ovvero:

$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_r - \Theta_0)(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

Nel caso di $t_0 = 0$ e $\Theta_0 = 0$, l'equazione del regime transitorio diventa:

$$\Theta = \Theta_r(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (4)$$

La relazione esponenziale (4) è rappresentata dalla curva di riscaldamento di fig. 2. Per $t = \Theta$ è $\Theta = \Theta_r$, cioè: la retta $\Theta = \Theta_r$ è un asintoto della curva. Il coefficiente angolare della retta tangente in un punto qualsiasi della curva è fornito dalla relazione già vista in precedenza:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_r - \Theta}{T}$$

Finora abbiamo considerato la macchina come un corpo omogeneo di grande condutività termica interna, in tale modo abbiamo potuto parlare di una singola sovratestermperatura della macchina. Sappiamo che ciò non corrisponde alla realtà: le macchine sono costituite da materiali di diversa natura e diversa conduttività termica (ferro magnetico, conduttori, isolanti, olio, materiali strutturali). Sia nel funzionamento a regime che durante i transitori termici, le sovratestermperature interne sono generalmente diverse da punto a punto. La trattazione rigorosa dei fenomeni transitori nelle macchine reali deve tener conto degli scambi interni di energia, e quindi delle potenze delle correnti termiche e delle resistenze attraversate; ci accontenteremo di raggiungere risultati approssimati, utilizzando le espressioni ricavate per la macchina omogenea. La somma delle capacità termiche delle singole parti che compongono la macchina permette di ottenerne la capacità "C" nel caso reale:

$$C = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots = \Sigma g c \quad [\text{J/K}]$$

Essendo "g" e "c" il peso e il calore specifico, rispettivamente, di una parte omogenea.

Per una descrizione più dettagliata in merito alla teoria sulla trasmissione del calore si rimanda a [1].

3. Caratteristiche tecniche principali del sistema di propulsione del treno ETR 500

3.1. Architettura generale del sistema di propulsione

Anche se, in senso stretto, il sistema di propulsione viene spesso identificato in gergo ferroviario con l'azionamento di trazione (Modulo di Trazione), vale la pena sottolineare che la propulsione della locomotiva, e quindi

$$C_1 = t_0 + T \ln(\Theta_r - \Theta_0)$$

Most often, at the beginning of the transitional period ($t = 0$), the machine is at room temperature, i.e. with overtemperature $\Theta_0 = 0$; in such cases we have:

$$C_1 = T \ln \Theta_r$$

If instead $t = 0$, the machine has an overtemperature $\Theta_0 \neq 0$, we have:

$$C_1 = T \ln(\Theta_r - \Theta_0)$$

With this constant value (3) becomes:

$$t = T \ln \frac{\Theta_r - \Theta_0}{\Theta_r - \Theta}$$

namely:

$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_r - \Theta_0)(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

Where $t_0 = 0$ e $\Theta_0 = 0$, the equation of the transitional regime becomes:

$$\Theta = \Theta_r(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (4)$$

The exponential relationship (4) is represented by the heating curve of fig. 2. For $t = \Theta$ is $\Theta = \Theta_r$, namely: the straight line $\Theta = \Theta_r$ is a curve asymptote. The angle coefficient of the tangent line at any point of the curve is given by the relation already seen before:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_r - \Theta}{T}$$

So far we have considered the machine as a homogeneous body of great internal thermal conductivity, so we could talk about a single overtemperature of the machine. We know that this does not correspond to reality: machines are made of different kinds of materials and different thermal conductivity (magnetic iron, conductors, insulation, oil, structural materials). Both in operation in steady state conditions and during thermal transients, the internal overtemperatures are generally different from point to point.

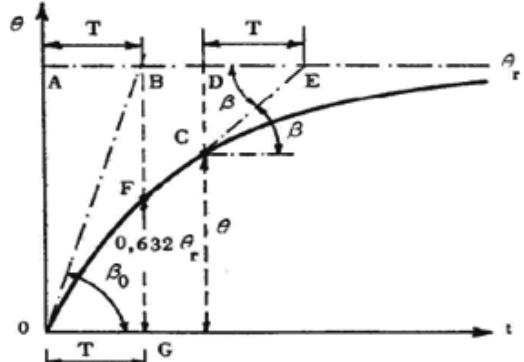


Fig. 2 - Curva di riscaldamento.
Fig. 2 - Heating curve.

SCIENZA E TECNICA

dell'intero convoglio, è altresì assicurata dal corretto funzionamento di altri organi di fondamentale importanza, quali convertitori per i servizi ausiliari, i carichi ausiliari di ventilazione e raffreddamento in genere, etc.

In fig. 3 è raffigurato, a livello schematico, il sistema di propulsione del treno ETR 500 Frecciarossa.

Partendo dalla catenaria troviamo i circuiti di protezione e sezionamento, tramite i quali è fornita l'alimentazione al trasformatore di trazione. Quest'ultimo prevede due configurazioni di funzionamento, ognuna relativa alla tipologia della catenaria (25 kVc.a, 3kV c.c.). In alternata la macchina svolge la vera e propria funzione di trasformazione della potenza e provvede ad abbassare la tensione per garantire l'alimentazione dei due azionamenti di locomotiva. In continua, sono sfruttati solamente gli avvolgimenti secondari in serie ad avvolgimenti aggiuntivi con lo scopo di realizzare i valori di induttanza necessaria per il filtro LC (lato rete) dell'azionamento. A valle del trasformatore vi sono due azionamenti identici e indipendenti, ciascuno composto da:

- *Convertitore di 1° stadio*. Esso svolge la funzione principale di adattare la tensione di catenaria (o quella dei secondari del trasformatore) al valore necessario per il bus DC dell'inverter di trazione. Tale convertitore prevede, analogamente al trasformatore, la variazione della propria configurazione di funzionamento al variare della tensione della catenaria. In 3 kV c.c. esso

The rigorous dissertation of transient phenomena in real machines must take into account internal energy exchanges, and thus thermal currents powers and crossed resistances; we will be satisfied with approximate results, using expressions derived for the homogeneous machine. The sum of the thermal capacity of the individual parts that make up the machine allows achieving capacity "C" in the real case:

$$C = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots = \Sigma g_i c_i \text{ [J/K]}$$

Being "g" and "c" respectively the weight and the specific heat of a homogeneous part.

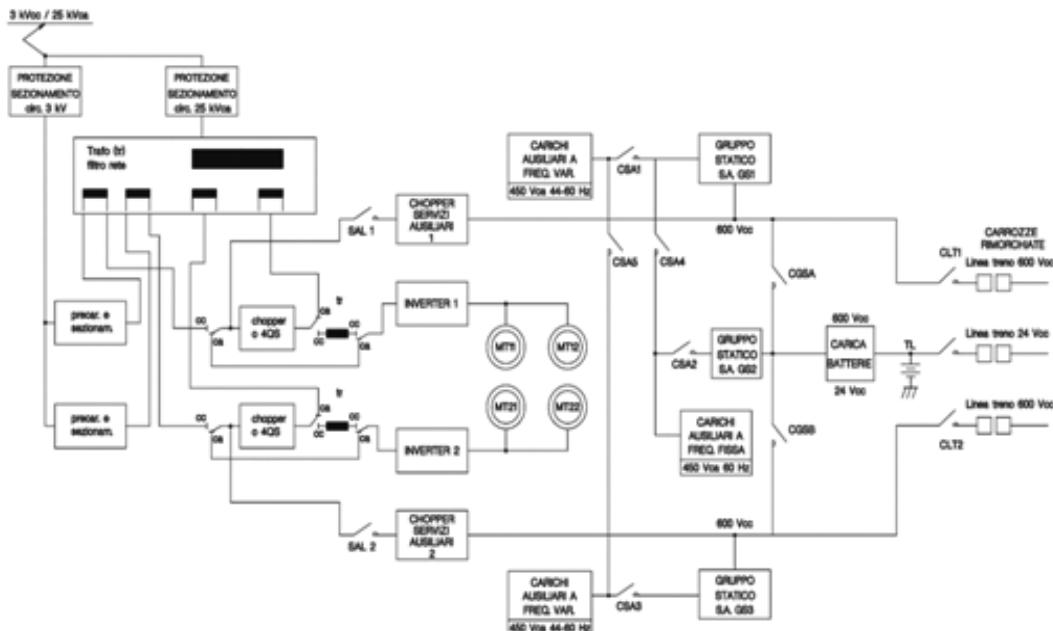
A more detailed explanation on the theory of heat transfer can be found in [1].

3. Main technical characteristics of the propulsion system of the ETR 500 train

3.1. General architecture of the propulsion system

Although, strictly speaking, the propulsion system is often identified in railway jargon with traction control (Traction Module), it is worth noting that the locomotive propulsion, and thus of the entire convoy, is also ensured by the proper functioning of other devices of fundamental importance, such as converters for auxiliary services, auxiliary ventilation and generally cooling loads, etc.

Fig. 3 shows the propulsion system of the ETR 500 Frecciarossa trains at a schematic level.



SCIENZA E TECNICA

funziona da chopper abbassatore a 3 livelli di tensione, ovvero abbassa la tensione da un valore di 3 kV (tensione di catenaria) a un valore di circa 2.4 kV (tensione del bus dc). Con catenaria a 25 kV c.a. si ha il funzionamento da raddrizzatore alzatore a quattro quadranti. In quest'ultima configurazione il convertitore raddrizza e aumenta la tensione ai capi dei secondari del trasformatore da un valore di 1300 V (valore efficace su un secondario del trasformatore) a 2400 V (valore medio sul bus dc dell'inverter).

- *Inverter.* A valle del convertitore di 1° stadio vi è l'inverter trifase di trazione, che converte la tensione continua all'ingresso in una terza di tensioni alternate, regolate in ampiezza e frequenza, secondo una strategia di controllo predeterminata ed implementata nella elettronica di bordo.
- *Chopper di frenatura.* Subito a valle del bus dc e a monte dell'inverter è inserito un chopper bifase con resistenze di frenatura in grado di dissipare l'energia derivata dai motori asincroni durante la fase di frenatura quando la linea non è di tipo ricettivo.
- *Motori di trazione.* L'ultimo elemento della catena di trazione è rappresentato dal motore di trazione. Ciascuno dei due azionamenti di locomotiva alimenta due motori.

Un ruolo fondamentale per il funzionamento del sistema di propulsione è ricoperto dai chopper dei servizi ausiliari. Essi provvedono alla conversione della tensione continua, che in d.c. è prelevata direttamente dalla linea, e in a.c. è prelevata dallo stadio intermedio all'uscita del 1° stadio, in una tensione pari a 600 V, regolata e controllata per l'alimentazione dei convertitori dei servizi ausiliari della locomotiva e, delle linee treno che provvedono a loro volta all'alimentazione dei convertitori dei servizi ausiliari delle carrozze, completi dei propri filtri di rete.

3.2. Sistemi di raffreddamento

In fig. 4 sono illustrati a livello schematico i principali sistemi di raffreddamento della catena di trazione dell'ETR 500.

In fig. 4 è possibile notare:

- *Le due torri di raffreddamento di locomotiva* hanno il compito di smaltire, per scambio forzato con aria ambiente in circuito aperto, le perdite provenienti dai convertitori dei due azionamenti di locomotiva e le perdite del trasformatore.
- *I due circuiti di raffreddamento relativi ai convertitori dei due azionamenti di locomotiva* sono caratterizzati dalla circolazione forzata del fluido refrigerante (acqua/glycole) attraverso le apposite tubazioni e i dissipatori di ogni modulo dei convertitori. Il fluido refrigerante è raffreddato dall'apposito scambiatore di calore situato all'interno della torre di raffreddamento.
- *Il circuito di raffreddamento del trasformatore* è carat-

Starting from the catenary we have the sectioning and protection circuits, through which power to the traction transformer is given. The latter has two operating configurations, each corresponding to the type of catenary (25 kV ac and 3kV DC). In AC the machine performs the actual power transformation function and takes care of lowering the voltage to ensure the supply of the two locomotive drives. In direct current, only the secondary windings in series to additional windings are exploited in order to achieve the required inductance values for the LC filter (network side) of the drive. Downstream of the transformer, there are two identical and independent drives, each consisting of:

1st stage converter. It has the main function of adjusting the voltage of the catenary (or that of the transformer's secondary) to the value required for the traction inverter's DC bus. This converter provides, similarly to the transformer, the variation of its functioning configuration as the catenary voltage varies. In 3 kV DC it runs as 3 voltage levels lowering chopper i.e. it lowers the voltage from a value of 3 kV (catenary voltage) to a value of about 2.4 kV (dc bus voltage). With a 25 kV AC catenary there is a four quadrants raiser rectifier operation. In the latter configuration, the converter rectifies and increases the voltage at the transformer secondaries terminals from a value of 1300 V (RMS on a secondary of the transformer) to 2400 V (average value on the inverter dc bus).

- *Inverter. Downstream of the 1st stage converter there is a traction three-phase inverter, which converts the input DC voltage in a triad of alternating voltages, adjusted in amplitude and frequency, according to a predetermined control strategy and implemented in the on-board electronics.*
- *Braking Chopper. A two-phase chopper with braking resistances is inserted immediately downstream of the dc bus and upstream of the inverter capable of dissipating the energy derived from asynchronous motors during the braking phase when the line is not receptive.*
- *Traction motors. The last element of the traction chain is represented by the traction motor. Each of the two locomotive drives powers two motors.*

A fundamental role in the operation of the propulsion system is covered by the auxiliary services chopper. They provide for the conversion of continuous voltage that in d.c. is taken directly from the line, and in a.c. is drawn from the intermediate stage at the 1st stage exit, in a voltage of 600 V, regulated and controlled to power the auxiliary services converters of the locomotive and train lines, that in turn feed the auxiliary services converters of carriages, with their network filters.

3.2. Cooling systems

Fig. 4 shows the main cooling systems of the ETR 500 traction chain at a schematic level.

In fig. 4 we can see:

- *the two locomotive cooling towers are designed to dispose of losses from the two locomotive drives converters*

SCIENZA E TECNICA

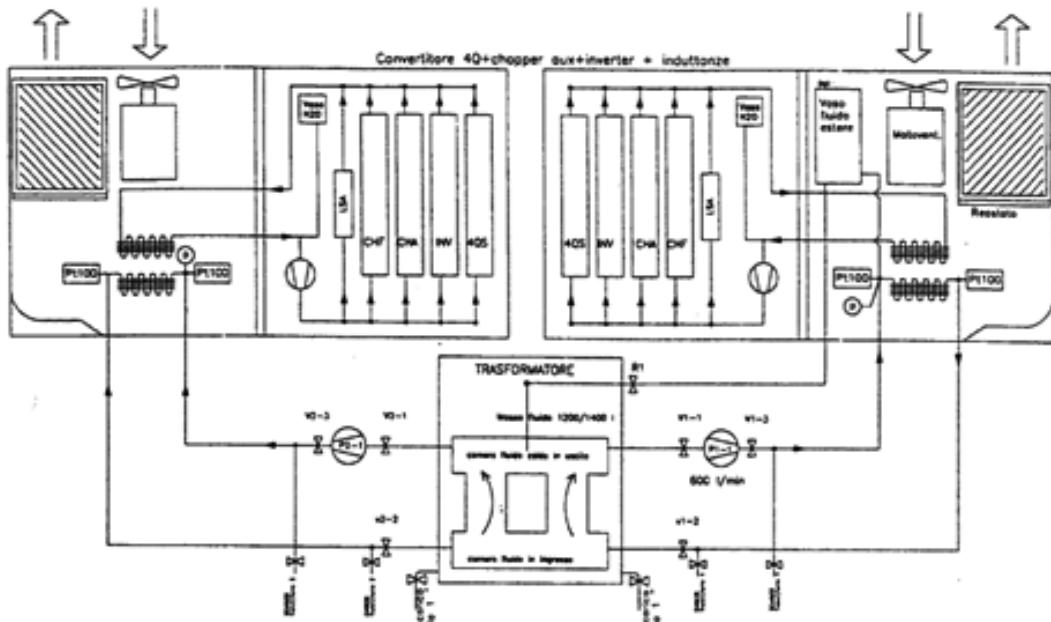


Fig. 4 - Rappresentazione schematica degli impianti di raffreddamento del trasformatore, dei convertitori e del reostato di frenatura.
Fig. 4 - Schematic representation of the transformer cooling systems, converters and the braking rheostat.

terizzato dalla circolazione forzata dell'olio all'interno dei vari canali assiali situati tra gli avvolgimenti del trasformatore. L'olio caldo è poi raffreddato dagli appositi scambiatori di calore, situati nelle torri di raffreddamento.

- I due reostati (1 per azionamento).

Occorre specificare che, quando ci si riferisce al circuito di raffreddamento del convertitore di trazione, vengono raffreddati i seguenti componenti:

- moduli dell'inverter di trazione;
- moduli del convertitore di 1° stadio;
- moduli del chopper ausiliari;
- induttanze di spianamento dei chopper ausiliari;
- moduli del chopper di frenatura.

Inoltre, occorre precisare che lo scambiatore del convertitore e quello del trasformatore sono realizzati in un unico monoblocco in alluminio, tuttavia, i 2 circuiti di raffreddamento relativi all'estere e all'acqua/glicole rispettivamente, sono separati e indipendenti. Essi sono solamente uno in serie all'altro rispetto al flusso dell'aria di raffreddamento. Il sistema di raffreddamento dei motori di trazione è indipendente e non rientra nei sistemi visti per il trasformatore e il convertitore. La ventilazione del motore è forzata. Per ogni motore è presente un motoventilatore.

and losses of the transformer by forced exchange with ambient air in open circuit;

- the two cooling circuits of converters related to the locomotive drives are characterised by forced circulation of the refrigerant (water/glycole) through the appropriate piping and heatsinks of each converter module. The refrigerant is cooled by a specific heat exchanger located inside the cooling tower;
- the cooling circuit of the transformer is characterised by the forced circulation of oil within the various axial ducts situated between the windings of the transformer. Hot oil is then cooled by specific heat exchangers in the cooling towers;
- the two rheostats (1 per drive).

We must specify that, when referring to the cooling system of the traction converter, the following components are cooled:

- the traction inverter modules;
- the 1st stage converter modules;
- the chopper auxiliary modules;
- smoothing chokes of the auxiliary choppers;
- braking chopper modules.

In addition, it should be noted that the heat exchanger of the converter and that of the transformer are made from a

SCIENZA E TECNICA

4. Modelli termici della catena di trazione

4.1. Introduzione

Nel capitolo 4 è affrontata la descrizione dei modelli termici dei principali componenti della catena di trazione (motore, convertitori, trasformatore), inoltre, è esposto il procedimento generale adottato per la realizzazione delle reti termiche e il calcolo dei relativi parametri circuituali. L'ambiente di simulazione ritenuto più idoneo per l'implementazione degli stessi modelli è l'ambiente "SIMULINK" di "MATLAB".

4.2. Procedimento generale per la realizzazione delle reti termiche

Una rete termica esaustiva nella rappresentazione dei fenomeni termici coinvolti all'interno del componente modellato è composta dai seguenti parametri circuituali:

- resistenze termiche di conduzione;
- resistenze termiche di convezione;
- capacità termiche.

Ognuno dei parametri sopra citati è stato calcolato a partire da dati geometrici e costruttivi disponibili dalle tabelle e dai disegni tecnici delle apparecchiature oggetto del modello. Per rendere più chiara ed efficace la descrizione dell'approccio generale utilizzato si rappresenta, di seguito, il calcolo della rete termica del motore. Lo stesso procedimento è utilizzato naturalmente anche per le reti termiche degli altri modelli sviluppati (trasformatore, convertitori di trazione).

Dai disegni tecnici del motore e dalle tabelle fisiche dei materiali costruttivi sono stati raccolti i dati (alcuni dei quali esposti in tabella 1), necessari al calcolo dei parametri circuituali della rete termica.

Utilizzando ed elaborando opportunamente i dati di tabella 1 ed inserendoli nelle formule seguenti, si ottengono i valori dei parametri circuituali della rete termica:

$$- R_{\text{cond}} = \frac{l}{\lambda \cdot A} [\text{K/W}]; \text{ (formula valida per le resistenze di conduzione, richiamata nel paragrafo 2.3);}$$

$$- R_{\text{conv}} = \frac{1}{\alpha \cdot A} [\text{K/W}]; \text{ (formula valida per le resistenze di convezione, richiamata nel paragrafo 2.3);}$$

$$- C = G \cdot c [\text{J/K}]; \text{ (formula valida per le capacità termiche, richiamata nel paragrafo 2.4).}$$

Il processo finale nella progettazione della rete termica consiste nell'affinare per processi iterativi i valori di alcuni parametri circuituali, in particolare ci si riferisce alle resistenze termiche per convezione forzata dovuta ai flussi dell'aria di raffreddamento sul motore. Agendo sul valore dei fattori di convezione " α ", si cerca di allineare i valori di temperatura forniti dal modello con i valori di temperatura disponibili da prove di tipo condotte sul mo-

single block of aluminium, however, the 2 cooling circuits related to the ester and to the water/glycol respectively, are separated and independent. They are only one in series with the other with respect to the cooling air flow. The cooling system of the traction motors is independent and is not within the systems seen for the transformer and the converter. The motor ventilation is forced. Each motor has a motor-driven fan.

4. Thermal models of the traction chain

4.1. Introduction

Chapter 4 deals with the description of thermal models of the main traction chain components (motor, converters, transformer) in addition the general procedure adopted for the construction of thermal networks and the calculation of related circuit parameters is explained. The simulation environment deemed more suitable for the implementation of these models is the "MATLAB" "SIMULINK" environment.

4.2. General procedure for the realisation of thermal networks

A thermal network complete in the representation of thermal phenomena involved within the modelled component consists of the following circuit parameters:

- thermal conduction resistances;
- thermal convection resistances;
- thermal capacities.

Each of the above parameters was calculated from geometric and structural data available from tables and technical drawings of the equipment object of the model. To make the description of the overall approach used clearer and more effective, below is the calculation of the motor thermal network. The same procedure is used also for thermal networks of other models developed (transformer, traction converters).

The data (some of which are set out in table 1), required for the calculation of thermal network circuit parameters were collected from the motor technical drawings and from the physical tables of the construction materials.

Using and developing the data in table 1 appropriately and entering it in the following formulae, the values of the thermal network circuit parameters are obtained:

$$- R_{\text{cond}} = \frac{l}{\lambda \cdot A} [\text{K/W}]; \text{ (valid formula for conduction resistances, recalled in paragraph 2.3);}$$

$$- R_{\text{conv}} = \frac{1}{\alpha \cdot A} [\text{K/W}]; \text{ (valid formula for convection resistance, recalled in paragraph 2.3);}$$

$$- C = G \cdot c [\text{J/K}]; \text{ (valid formula for thermal capacities, recalled in paragraph 2.4).}$$

The final process in the design of the thermal network is to refine the values of certain circuit parameters for iterative processes, notably referring to thermal resistances for forced

SCIENZA E TECNICA

TABELLA 1 - TABLE 1

DATI GEOMETRI E FISICI DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI DEL MOTORE
GEOMETRIC AND PHYSICAL DATA OF MOTOR COMPONENTS

Dati motore <i>Motor Data</i>	Valore <i>Value</i>
N_barre_rotoriche - <i>N rotor bars</i>	72
Altezza_barra - <i>Bar height</i>	0.01815 m
Larghezza_barra - <i>Bar width</i>	0.00765 m
Lunghezza_barra - <i>Bar length</i>	0.457 m
L_aria_barra - <i>L bar air</i>	0.0001 m
Spessore_traferro - <i>Air gap thickness</i>	0.00209 m
Diametro_est_rotore - <i>Rotor ext diameter</i>	0.4259 m
Spessore_corona_rotorica - <i>Rotor crown thickness</i>	0.1048 m
Altezza_dente_rotorico - <i>Rotor teeth height</i>	0.02315 m
Numeri_canali_rotore - <i>Rotor duct number</i>	36
Diametro_canali_rotore - <i>Rotor duct diameter</i>	0.025 m
N_cave_statoriche - <i>Stator slot number</i>	60
Lunghezza_pacco_lamellato_statore - <i>Stator lamination stack length</i>	0.375 m
Diametro_interno_statore - <i>Stator internal diameter</i>	0.4308 m
Numeri_canali_maggiori_statore - <i>Stator major ducts number</i>	24
Numeri_canali_minori_statore - <i>Stator minor ducts number</i>	8
Altezza_cava - <i>Slot height</i>	0.0469 m
Larghezza_cava - <i>Slot width</i>	0.0093 m
Lunghezza_conduttori_attivi - <i>Live conductor length</i>	0.405 m
Spessore_corona_statorica - <i>Stator crown thickness</i>	0.1076 m
Diametro_medio_corona - <i>Crown average diameter</i>	0.6315 m
Sporgenza_testata - <i>Head protrusion</i>	0.130 m
Lunghezza_testata/spira - <i>Head/coil length</i>	0.90344 m
Diametro_interno_statore/lamierino_testa - <i>Internal diameter stator/Head lamination</i>	0.431 m
Altezza_cava/lamierino_testa - <i>Height slot/Head lamination</i>	0.047 m
Spessore_rientro_di_cava - <i>Slot indent thickness</i>	0.0036 m
Altezza_bobina_di_testa (con isolamento) - <i>Head reel height (with insulation)</i>	0.01996 m
Larghezza_bobina_di_testa (con isolamento) - <i>Head reel width (with insulation)</i>	0.0082 m
Fill_factor_testate - <i>Head fill factor</i>	0.3895
Larghezza_anello_rotorico - <i>Rotor ring width</i>	0.0205 m
Altezza_anello_rotorico - <i>Rotor ring height</i>	0.05745 m
Raggio_medio_anello_rotorico - <i>Rotor ring average radius</i>	0.1792 m
Larghezza_piattina_rame (statore) - <i>Copper_strip_width (stator)</i>	0.0071 m
Altezza_piattina_rame (statore) - <i>Live conductor length</i>	0.0019 m
Spessore_smalto_piattina - <i>Strip enamel thickness</i>	0.00011 m
Spessore_isolante_bobina - <i>Reel insulation thickness</i>	0.00072 m
Spessore_impregnante_cava - <i>Slot impregnating agent thickness</i>	0.00027 m
Spessore_isolante_bobina (testata) - <i>Reel insulation thickness (head)</i>	0.00024 m
Spessore_nastro_vetro (testata) - <i>Glass tape thickness (head)</i>	0.0002 m
Conducibilità_termica_aria - <i>Air thermal conductivity</i>	0.027 W/mK
Conducibilità_termica_ferro - <i>Iron thermal conductivity</i>	28 W/mK
Conducibilità_termica_rame - <i>Copper thermal conductivity</i>	386 W/mK
Conducibilità_termica_mica - <i>Mica thermal conductivity</i>	0.2 W/mK
Conducibilità_termica_resina_siliconica - <i>Silicon resin thermal conductivity</i>	0.2 W/mK
Conducibilità_termica_vetro - <i>Glass thermal conductivity</i>	0.2 W/mK
Calore_specifico_lamierino - <i>Plate specific heat</i>	460 J/KgK
Calore_specifico_rame - <i>Copper specific heat</i>	400 J/KgK
Densità_lamierino - <i>Plate density</i>	7800 Kg/m ³
Densità_rame - <i>Copper density</i>	8954 Kg/m ³

tore. In questa maniera si rende il modello realistico. Tale procedimento è schematizzato nella fig. 5.

E' necessario precisare che i valori di temperatura delle prove di tipo, presi come riferimento per la stima dei fattori di convezione forzata "α", sono riferiti alla condizione di regime termico delle apparecchiature. Tuttavia, come è evidente in fig. 5, è stato verificato l'allineamento tra valori di temperatura di simulazione e valori di temperatura di prova in tutto il transitorio termico.

4.3. Struttura dei modelli

Il simulatore termico descritto in tale articolo è costituito dall'insieme dei 3 modelli termici relativi ai princi-

convection due to cooling air flows on the motor. Using the convection factors value "α", we try to align the temperature values provided by the model with temperature values obtained from type tests conducted on the motor. This way the realistic model is expressed. This process is outlined in fig. 5.

It is necessary to specify that the temperature values of type tests, taken as reference to estimate forced convection factors "α", refer to the thermal regime of the equipment. However, as is evident in fig. 5, the alignment between simulation temperature values and test temperature values across the thermal transient has been verified.

4.3. Structure of models

The thermal simulator described in this article consists of the set of 3 thermal models relating to the major traction chain components: motor, converters group and transformer. We should start by saying that the same simulator and therefore models can be interfaced with input variable specifications, i.e. temporal trends of: traction effort, train speed and catenary voltage. The latter are provided by the "section simulator" that simulates the train operating conditions along a generic route. Each model is structured (in SIMULINK) according to the scheme shown in fig. 6.

In particular we have:

- Subsystem 1. It has the task of making the model compatible with the input variables coming from the route simulator. In particular they are manipulated and transformed in order to obtain other types of variables directly useful to subsystem 2, used for the calculation of losses.
- Subsystem 2. It implements a method of calculation that allows obtaining the losses in the various active parts of the simulated machine. (e.g. for the motor we have losses in the windings of the stator, rotor bars, teeth, etc.).
- Subsystem 3. It is the thermal network of the simulated equipment. The implemented network takes into account the main heat flows involved in the operation, as well as the dynamics of thermal phenomena (dynamic thermal networks). The values of losses (in the different active parts of the equipment), calculated by subsystem 2, are inserted in input in the current generators controlled by the thermal network.

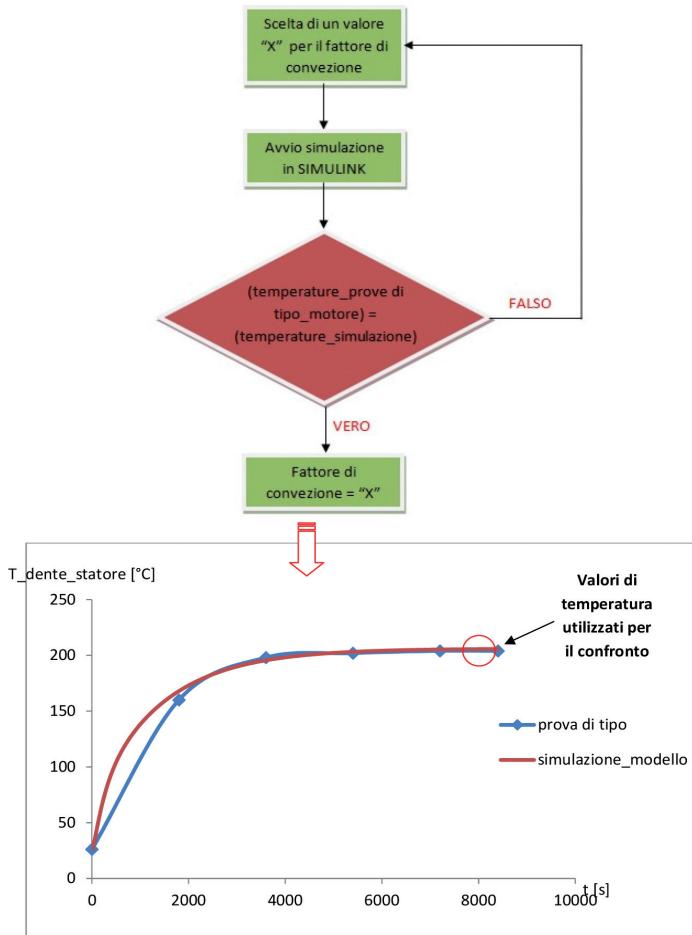


Fig. 5 - Procedimento iterativo per la stima degli "α".
Fig. 5 - Iterative procedure for the estimation of "α".

SCIENZA E TECNICA

pali componenti della catena di trazione: motore, gruppo convertitori e trasformatore. Occorre premettere che lo stesso simulatore e quindi i modelli sono interfacciabili con le specifiche variabili in input, ovvero gli andamenti temporali di: sforzo di trazione, velocità del treno e tensione della catenaria. Queste ultime sono fornite dal software "simulatore di tratta" che simula le condizioni operative del treno lungo una generica tratta. Ciascun modello è strutturato (in SIMULINK) secondo lo schema rappresentato in fig. 6.

In particolare si ha:

- **Sottosistema 1.** Ha il compito di rendere interfacciabile il modello con le variabili in input provenienti dal simulatore di tratta. In particolare esse vengono manipolate e trasformate con lo scopo di ottenere altre tipologie di variabili direttamente utili al sottosistema 2, adibito al calcolo delle perdite.
- **Sottosistema 2.** Implementa al suo interno un metodo di calcolo che consente di ottenere le perdite nelle varie parti attive della macchina simulata. (Es. per il motore si hanno le perdite negli avvolgimenti di statora, nelle barre di rotore, nei denti, ecc.).
- **Sottosistema 3.** Costituisce la rete termica dell'apparecchiatura simulata. La rete implementata tiene conto dei principali flussi di calore coinvolti nel funzionamento, nonché della dinamica dei fenomeni termici (reti termiche dinamiche). I valori delle perdite (nelle varie parti attive delle apparecchiature), calcolate dal sottosistema 2, sono inseriti in ingresso nei generatori di corrente controllati della rete termica.
- **Sottosistema 4.** Nel presente sottosistema vengono visualizzati i risultati della simulazione, ovvero gli andamenti temporali delle temperature nelle varie sezioni costruttive dei dispositivi simulati. Le temperature fornite, in particolare, sono quelle misurate in tutti i nodi circuituali della rete termica implementata nel modello (sottosistema 3).

Infine, va precisato che i valori di temperatura forniti in uscita dai modelli in oggetto sono in realtà i salti termici con l'aria esterna. Questo fatto trova giustificazione nella struttura topologica delle reti termiche implementate (i potenziali dei nodi della rete si riferiscono al potenziale di terra, ovvero al potenziale nullo). Dunque, per risalire alla temperatura assoluta di un generico elemento costruttivo è necessario sommare la temperatura dell'aria esterna al valore fornito in uscita dalla simulazione (visualizzato all'interno del sottosistema 4).

4.4. Motore

4.4.1. Premessa

A differenza degli altri elementi della catena di trazione, per i quali è stata eseguita l'implementazione dei modelli in SIMULINK, nel caso del

- Subsystem 4. In this subsystem the results of the simulation are displayed - temporal trends of temperatures in the various construction sections of simulated devices. In particular the temperatures provided are those measured on all circuit nodes of the thermal network implemented in the model (subsystem 3).

Finally, it should be noted that the output temperature values from the above-mentioned models are actually thermal jumps with outside air. This is justified by the topological structure of thermal networks implemented (the potential of network nodes refer to the ground potential, i.e. the void potential). Therefore, to go back to the absolute temperature of a generic constructive element we need to sum the external air temperature with the value provided in output from the simulation (displayed within subsystem 4).

4.4. Motor

4.4.1. Introduction

Unlike other elements of the traction chain, for which the implementation of models in SIMULINK has been performed, in the case of the motor a first implementation was made using a professional software used for thermal analysis of rotating electrical machines: "MOTORCAD". This step was necessary to obtain a thermal network sufficiently representative of the thermal phenomena involved in the machine and use this network as a reference for the subsequent implementation of the model in SIMULINK.

4.4.2. Implementation in MOTORCAD

The procedure adopted in the implementation of the simulation in MOTORCAD is as follows:

- Setting of the constructive and geometric characteristics of the motor (fig. 7). This phase was carried out with the aim of representing as faithfully as possible the particular geometry of the traction engine concerned; the characteristics of the stator and rotor windings were also set.
- Setting of cooling options. In addition to the type of cooling and refrigerant, the options for the axial engine cooling and head cooling options were set (in which the rotation of the rotor operates).
- Setting of losses. Certain values have been established for the various contributions of losses (losses in copper,

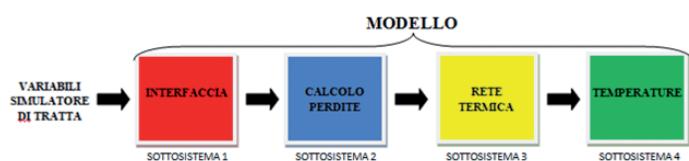


Fig. 6 - Struttura schematica del generico modello.
Fig. 6 - Generic model schematic structure.

SCIENZA E TECNICA

motore è stata effettuata una prima implementazione impiegando un software professionale adibito all'analisi termica delle macchine elettriche rotanti: "MOTORCAD". Questo passaggio è risultato necessario per ottenere una rete termica sufficientemente rappresentativa dei fenomeni termici coinvolti nella macchina e utilizzare tale rete come riferimento per la successiva realizzazione del modello in SIMULINK.

4.4.2. Implementazione in MOTORCAD

Il procedimento adottato nella realizzazione della simulazione in MOTORCAD è il seguente:

- *Impostazione delle caratteristiche geometriche e costruttive del motore* (fig. 7). Tale fase è stata svolta con l'obiettivo di rappresentare nella maniera più fedele possibile la particolare geometria del motore di trazione in oggetto, sono state impostate anche le caratteristiche degli avvolgimenti di statore e rotore.
- *Impostazione delle opzioni di raffreddamento*. Oltre alla tipologia di raffreddamento e fluido refrigerante, sono state impostate le opzioni relative al raffreddamento assiale del motore e le opzioni relative al raffreddamento di testata (nel quale interviene la rotazione del rotore).
- *Impostazione delle perdite*. Sono stati fissati determinati valori per i vari contributi di perdite (perdite nel rame, nel ferro, per attrito dei cuscinetti). In particolare tali valori si riferiscono alle condizioni operative del motore.

Terminata la fase relativa alle impostazioni, è stata av-

in iron, due to bearing friction). In particular these values refer to the motor operating conditions.

When the settings phase has been completed, simulation was started and the software provided a detailed thermal network in output (fig. 8), representative of thermal phenomena inside the machine, on which it was possible to examine the values of the various circuit parameters and temperature trends. This network allowed highlighting the constructive components of the more stressed motor from a thermal point of view.

The various components of the engine in the thermal network are distinguished, in particular:

- Grey = motor shaft;
- Blue = rotor lamination stack;
- Red = stator lamination stack;
- Brown = outer casing;
- Yellow = stator windings and rotor bars.

In addition, the network includes: thermal resistances (represented by rectangles), nodes (represented by a circle), thermal power sources and thermal power flows disposed of by cooling air (represented by two overlapping circles). Thermal capacities are not displayed because they are included in the nodes.

4.4.3. Implementation in "SIMULINK"

4.4.3.1. Thermal network

The engine model, made in SIMULINK, has a structure like the one illustrated in fig. 6. The first phase of construc-

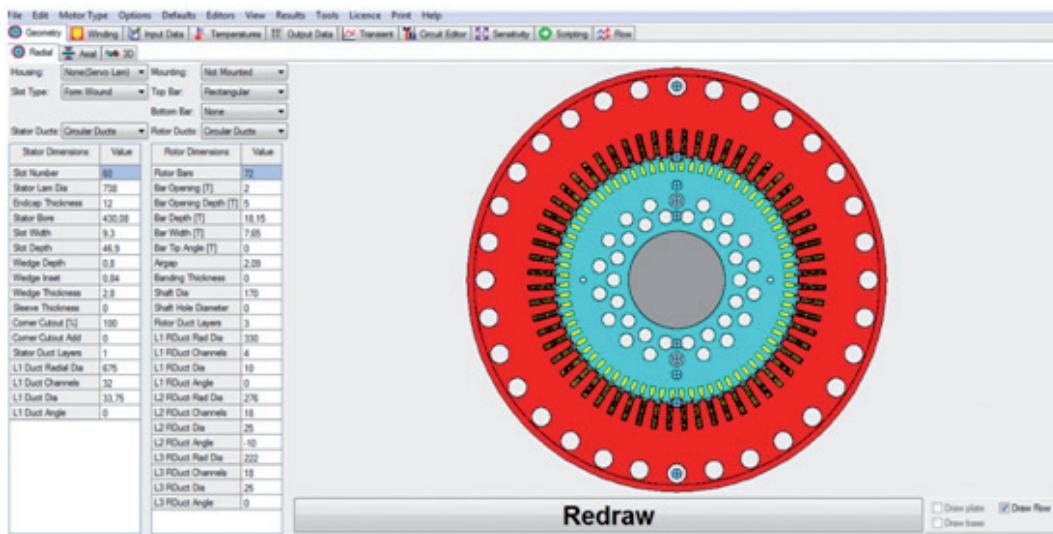


Fig. 7 - Finestra relativa alle impostazioni geometriche del motore.
Fig. 7 - Motor geometric settings window.

viata la simulazione e il software ha fornito in uscita una rete termica dettagliata (fig. 8), rappresentativa dei fenomeni termici all'interno della macchina, sulla quale è stato possibile esaminare i valori dei vari parametri circuituali nonché gli andamenti di temperatura. Tale rete ha consentito di evidenziare i componenti costruttivi del motore maggiormente sollecitati da un punto di vista termico.

Nella rete termica sono distinti i vari componenti costruttivi del motore, in particolare si ha:

- Grigio = albero motore;
- Azzurro = pacco lamellato rotorico;
- Rosso = pacco lamellato statorico;
- Marrone = carcassa esterna;
- Giallo = avvolgimenti statorici e barre rotoriche.

Inoltre, nella rete vi sono: resistenze termiche (rappresentate da rettangoli), nodi (rappresentati da un cerchio), sorgenti di potenza termica e flussi di potenza termica smaltiti dall'aria di raffreddamento (rappresentati da due cerchi sovrapposti). Le capacità termiche non sono visualizzate poiché sono incluse nei nodi.

4.4.3. Implementazione in "SIMULINK"

4.4.3.1. Rete termica

Il modello del motore, realizzato in SIMULINK, ha una struttura come quella rappresentata in fig. 6. La prima fase della realizzazione è stata quella di costruire una rete termica prendendo spunto da quella fornita dalla simulazione in MOTORCAD, di conseguenza, è stato implementato un metodo di calcolo delle perdite nelle varie

tion was to build a thermal network taking a cue from that provided by the MOTOCARD simulation, therefore, a method of calculation of losses in the various active parts of the engine was implemented and finally the block for the display of temperature in the various nodes in the network was built.

In particular, an analysis of the MOTOCARD thermal network was carried out, as can be seen in fig. 9, the branches affected by major thermal power flows were selected. The selected structure was taken as a reference to generate the thermal network in SIMULINK.

As the MOTOCARD simulation tests the independence from a thermal point of view between rotor and stator, hence, two separate thermal networks were created in SIMULINK; they are represented in Fig. 10. The calculation of circuit parameters (thermal resistance, thermal capacity) already analysed in paragraph 4.2, has been conducted in a rigorous manner, using geometric and physical characteristics of the engine, purpose of the model..

The tables (table 2a-2b) show the circuit parameters of the engine thermal networks.

Fig. 11 describes, in general terms, the constructive geometry of the engine.

4.4.3.2. Calculation of losses

Thermal power generators in the two networks express losses in active parts of the stator and rotor. Those losses are estimated through a particular subsystem, that implements a method of calculation based on an analysis of the operation of the engine. The subsystem in question receives some input between the variables provided by the section simulator (or the traction effort and speed of the train) and

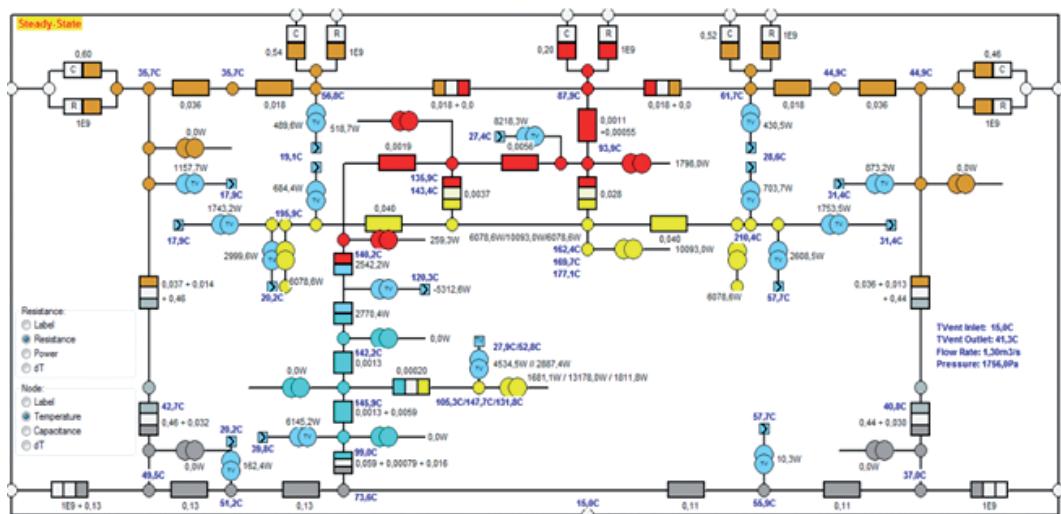


Fig. 8 - Rete termica fornita dalla simulazione in MOTOCARD.
Fig. 8 - Thermal network provided by the MOTOCARD simulation.

SCIENZA E TECNICA

parti attive del motore e infine è stato realizzato il blocco relativo alla visualizzazione delle temperature nei vari nodi della rete.

E' stata effettuata un'analisi della rete termica di MOTORCAD, in particolare, come è possibile vedere in fig. 9, sono stati selezionati i rami interessati dai flussi di potenza termica di maggior entità. La struttura selezionata è stata presa come riferimento per generare la rete termica in SIMULINK.

Poiché la simulazione in MOTORCAD verifica l'indipendenza da un punto di vista termico tra rotore e statore, allora, in SIMULINK sono state create due reti termiche separate; esse sono rappresentate in fig.10. Il calcolo dei parametri circuituali (resistenze termiche, capacità termiche), già analizzato nel paragrafo 4.2, è stato condotto in maniera rigorosa impiegando le caratteristiche geometriche e fisiche del motore, oggetto del modello.

Nelle tabelle (tabella 2a-2b) sono descritti i parametri circuitali delle reti termiche del motore.

Nella fig. 11, è descritta, in maniera generale, la geometria costruttiva del motore.

4.4.3.2. Calcolo delle perdite

I generatori di potenza termica nelle due reti esprimono le perdite nelle parti attive di statore e rotore. Tali perdite sono stimate attraverso un determinato sottosistema, che implementa un metodo di calcolo basato su un'analisi del funzionamento del motore. Il sottosistema in oggetto riceve in ingresso alcune tra le variabili fornite dal simulatore di tratta (ovvero lo sforzo di trazione e la velo-

returns in output the various losses contributions. The calculation method is implemented as follows:

- From the values of the traction effort and train speed the value of the power supplied to the shaft of the single engine is obtained and the frequency of the stator (both in nominal flux regime and in defluxing) is calculated, the calculation diagram is represented in fig. 12;
 - from the values of the shaft power and of the stator frequency, calculated in the preceding paragraph, we estimate the values of efficiency and therefore the total value of losses;
 - finally, the total losses are separated into the various contributions by means of proportional coefficients (estimated on the basis of distribution of loss, in relation to a specific engine operating condition).

Now point 1, considered of major interest, is analysed.

The value of the shaft power is calculated by obtaining the values of torque and angular speed of the engine from the traction effort and train speed values. The implemented method for the calculation of the stator frequency both in nominal regime and in defluxing regime, deserves a close examination.

Calculation of stator frequency at nominal flux regime

Simplification hypothesis: we assume that the rotor frequency is linked by a linear proportionality to the shaft torque approximating to a line the descender of the mechanical characteristic of the asynchronous motor (this assumption is only valid in non-defluxing regime).

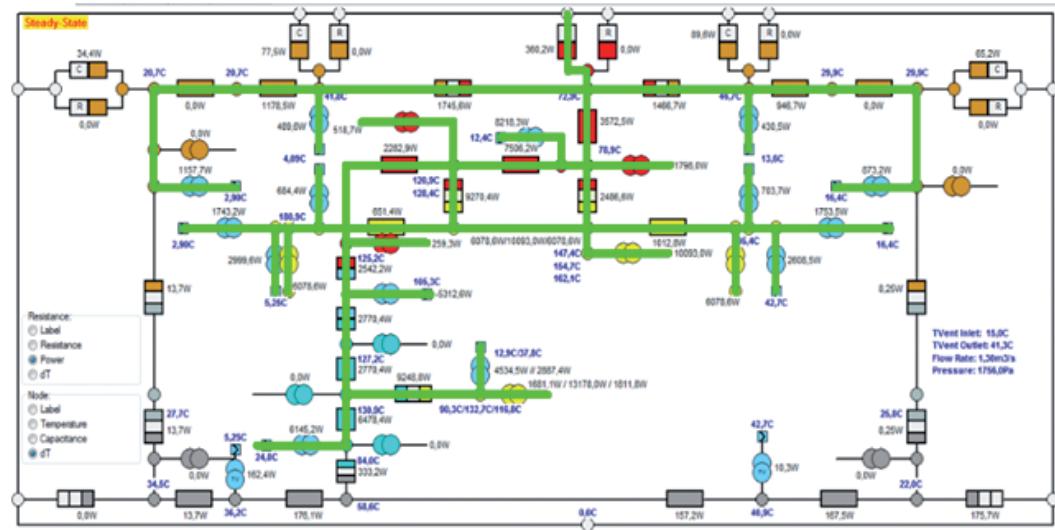


Fig. 9 - Processo di semplificazione della rete termica in MOTORCAD.
Fig. 9 - Simplification process of the MOTORCAD thermal network.

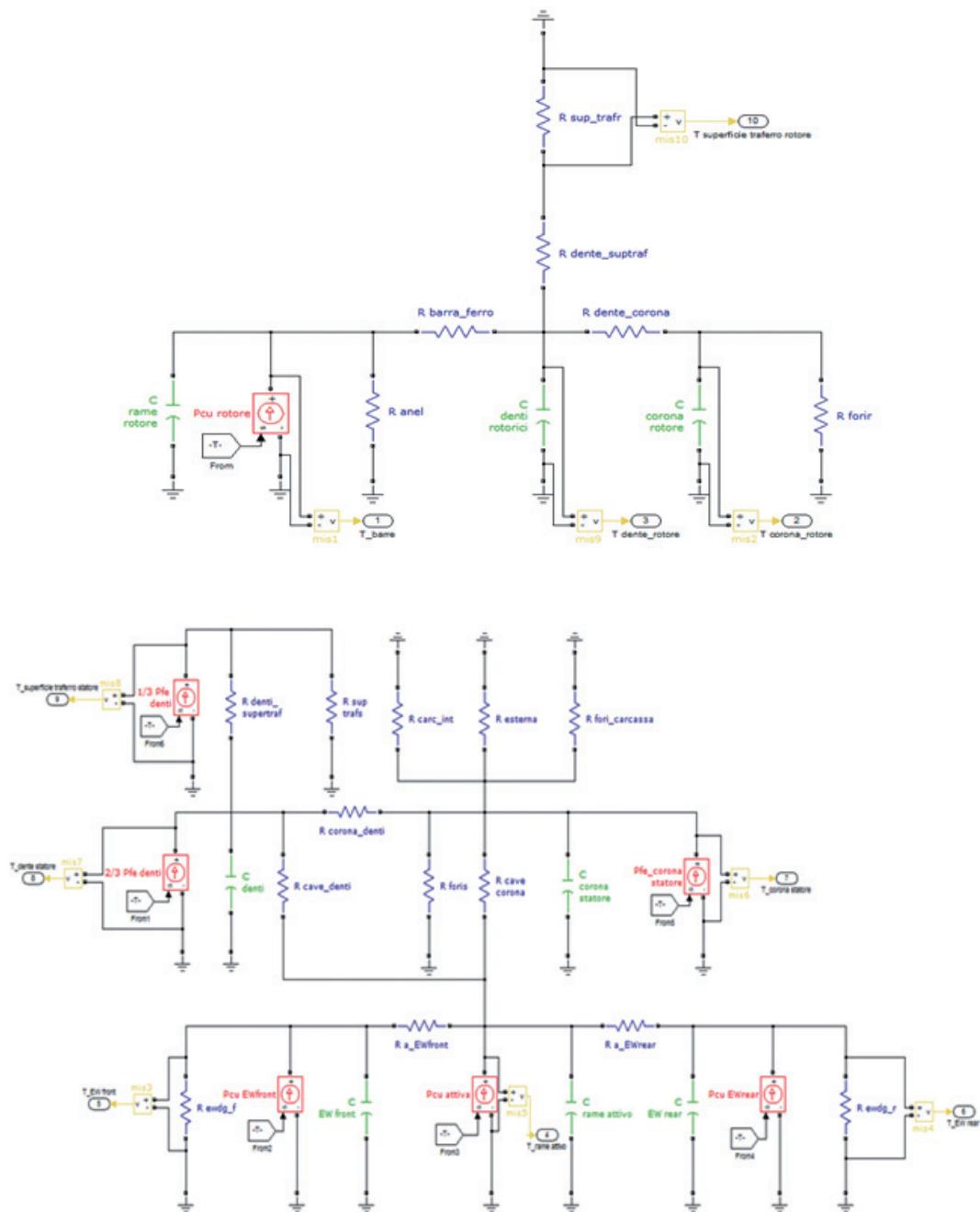


Fig. 10 - Reti termiche di rotore e statore (SIMULINK).
Fig. 10 - Thermal networks of rotor and stator (SIMULINK).

SCIENZA E TECNICA

TABELLA 2a - TABLE 2a

PARAMETRI CIRCUITALI DELLA RETE TERMICA DI ROTORE
CIRCUIT PARAMETERS OF ROTOR THERMAL NETWORK

Rotore - Rotor	
Parametro - Parameter	Significato - Meaning
R anel <i>R ring</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione forzata nelle superfici degli anelli esposte al flusso d'aria <i>Thermal resistance due to forced convection in the surfaces of the rings exposed to airflow</i>
R barra_ferro <i>R iron - bar</i>	Resistenza termica dovuta alla conduzione dello strato di aria tra le barre rotoriche e le superfici di cava <i>Thermal resistance due to conduction of the layer of air between the rotor bars and slot surfaces</i>
R dente_crona <i>R teeth - crown</i>	Resistenza termica di conduzione tra la corona rotorica e i denti di rotore <i>Thermal conduction resistance between the rotor crown ring and rotor teeth</i>
R forir <i>R forir</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione forzata nelle superfici dei canali rotorici assiali di raffreddamento <i>Thermal resistance due to forced convection in the surfaces of the rotor axial cooling ducts</i>
R dente_supraf <i>R teeth_air gap surf</i>	Resistenza termica di conduzione tra i denti di rotore e la superficie rotorica affacciata al traferro <i>Thermal conduction resistance between the rotor teeth and the rotor surface overlooking the air gap</i>
R sup_trafr <i>R surf_air gap</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione sulle superfici rotoriche affacciate al traferro <i>Thermal resistance due to convection on rotor surfaces overlooking the air gap</i>
C rame rotore <i>C rotor copper</i>	Capacità termica delle barre di rotore <i>Heat capacity of rotor bars</i>
C denti rotorici <i>C rotor teeth</i>	Capacità termica dei denti di rotore <i>Heat capacity of rotor teeth</i>
C corona rotore <i>C rotor crown</i>	Capacità termica della corona di rotore <i>Heat capacity of rotor crown</i>
Pcu rotore <i>Pcu rotor</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite nel rame rotorico <i>Thermal power generator representative of losses in rotor copper</i>

TABELLA 2b - TABLE 2b

PARAMETRI CIRCUITALI DELLA RETE TERMICA DI STATORE
CIRCUIT PARAMETERS OF STATOR THERMAL NETWORK

Stator - Stator	
Parametro - Parameter	Significato - Meaning
R ewdg_f <i>R ewdg_f</i>	Resistenza termica della testata frontale composta dalla serie della resistenza di conduzione dovuta allo strato isolante di testata e della resistenza dovuta alla convezione nelle superfici esterne di testata esposte all'aria <i>Thermal resistance of the front head composed by the series of conduction resistances due to the head insulating layer and resistance due to convection in the outer surfaces of head exposed to air</i>
R a_EWfront <i>R a_EWfront</i>	Resistenza termica di conduzione tra la testata frontale e la parte attiva degli avvolgimenti statorici <i>Thermal conduction resistance between the front head and the active part of the stator windings</i>
R a_EWrear <i>R a_EWrear</i>	Resistenza termica di conduzione tra la testata posteriore e la parte attiva degli avvolgimenti statorici <i>Thermal conduction resistance between the rear head and the active part of the stator windings</i>
R ewdg_r <i>R ewdg_r</i>	Resistenza termica della testata posteriore composta dalla serie della resistenza di conduzione dovuta allo strato isolante di testata e della resistenza dovuta alla convezione nelle superfici esterne di testata esposte all'aria <i>Thermal resistance of rear head composed by the series of conduction resistances due to the head insulating layer and of resistance due to convection in the outer surfaces of the head exposed to air</i>
R cave corona <i>R slot - crown</i>	Resistenza termica data dalla serie tra la resistenza termica di conduzione dello strato isolante della parte superiore degli avvolgimenti statorici e la resistenza termica di conduzione del volume di ferro compreso tra la superficie superiore delle cave di statore e il diametro medio della corona <i>Thermal resistance due to the series between thermal conduction resistance of the insulating layer of the upper part of the stator windings and the thermal conduction resistance of the iron mass between the top surface of the stator slots and the average diameter of the crown</i>
R foris <i>R foris</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione sulle superfici dei canali assiali di raffreddamento del pacco lamellato di statore <i>Thermal resistance due to convection on the surfaces of axial cooling ducts of the stator lamination stack</i>
R corona_denti <i>R crown</i>	Resistenza termica di conduzione tra corona e denti di statore <i>Thermal conduction resistance between crown ring and stator teeth</i>

(Continua)

SCIENZA E TECNICA

(Segue) TABELLA 2b - TABLE 2b

R cave denti <i>R slot - teeth</i>	Resistenza termica di conduzione dovuta allo strato di isolante nelle superfici di interfaccia tra avvolgimenti e denti di statore <i>Thermal conduction resistance due to the insulating layer in the interface surfaces between windings and stator teeth</i>
R denti_supertraf. <i>R teeth_air gap surf.</i>	Resistenza termica di conduzione tra denti di statore e superficie statorica affacciata al traferro <i>Thermal conduction resistance between the stator teeth and the stator surface overlooking the air gap</i>
R suprtrafs. <i>R air gap surf.</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione nella superficie di statore affacciata al traferro <i>Thermal resistance due to convection in the stator surface overlooking the air gap</i>
R carc_int <i>R housing</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione nelle superfici interne della carcassa soggette al flusso dell'aria di raffreddamento <i>Thermal resistance due to convection in the interior surfaces of the housing which are subject to the cooling air flow</i>
R esterna <i>R exter.</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione naturale sulle superfici esterne della carcassa del motore <i>Thermal resistance due to natural convection on the exterior surfaces of the motor housing</i>
R fori_carcassa <i>R duct surfaces</i>	Resistenza termica dovuta alla convezione nelle superfici dei canali di ingresso e di uscita dell'aria di raffreddamento <i>Thermal resistance due to the convection in entry and exit ducts surfaces of the cooling air</i>
C EW front <i>C EW front</i>	Capacità termica degli avvolgimenti della testata frontale <i>Heat capacity of the windings of the front head</i>
C rame attivo <i>C act. Stator wind.</i>	Capacità termica degli avvolgimenti attivi di statore <i>Heat capacity of active stator windings</i>
C EW rear <i>C EW rear</i>	Capacità termica degli avvolgimenti della testata posteriore <i>Heat capacity of the windings of the rear head</i>
C corona statore <i>C stator crown</i>	Capacità termica della corona statorica <i>Heat capacity of stator crown</i>
C denti <i>C teeth</i>	Capacità termica dei denti di statore <i>Heat capacity of stator teeth</i>
PcuEWfront <i>PcuEWfront</i>	Generatore delle perdite negli avvolgimenti della testata frontale <i>Generator of losses in the windings of the front head</i>
Pcu attiva <i>Pcu act. windings</i>	Generatore delle perdite negli avvolgimenti attivi <i>Generator of losses in the active windings</i>
PcuEWrear <i>PcuEWrear</i>	Generatore delle perdite negli avvolgimenti della testata posteriore <i>Generator of losses in the windings of the rear head</i>
2/3 Pfe denti <i>2/3 Pfe teeth</i>	Generatore delle perdite nella parte interna dei denti <i>Generator of losses in the inside of teeth</i>
Pfe corona statore <i>Pfe_stator crown</i>	Generatore delle perdite nella corona di statore <i>Generator of losses in stator crown</i>
1/3 Pfe denti <i>1/3 Pfe teeth</i>	Generatore delle perdite nella parte esterna dei denti (affacciata al traferro) <i>Generator of losses in the outside of teeth (overlooking the air gap)</i>

cià del treno) e restituisce in uscita i vari contributi delle perdite. Il metodo di calcolo implementato è strutturato come segue:

- dai valori dello sforzo di trazione e della velocità del treno si ricava il valore della potenza erogata all'albero dal singolo motore e si calcola inoltre la frequenza di statore (sia in regime di flusso nominale, sia in deflussaggio), lo schema di calcolo è rappresentato in fig.12;
- dai valori della potenza all'albero e della frequenza statorica, calcolati al punto precedente, si stimano i valori di rendimento e perciò il valore globale delle perdite;
- infine, le perdite totali sono separate nei vari contributi tramite dei coefficienti proporzionali (stimati sul-

Fig. 13 shows the "linearisation" of the descender mechanical characteristics in nominal flux regime.

The coefficient of proportionality between torque and rotor frequency was obtained with the nominal values of the same:

$$\alpha_{fr} = \frac{fr_nom}{C_nom}$$

where:

- fr_nom = nominal rotor frequency in Hz;
- C_nom = nominal torque in Nm.

Using this calculation method it is possible to obtain the stator frequency from the torque and mechanical frequency values, in fact:

$$fs = fm + fr = fm + (C \cdot \alpha_{fr}) [Hz];$$

Calculation of stator frequency in defluxing regime

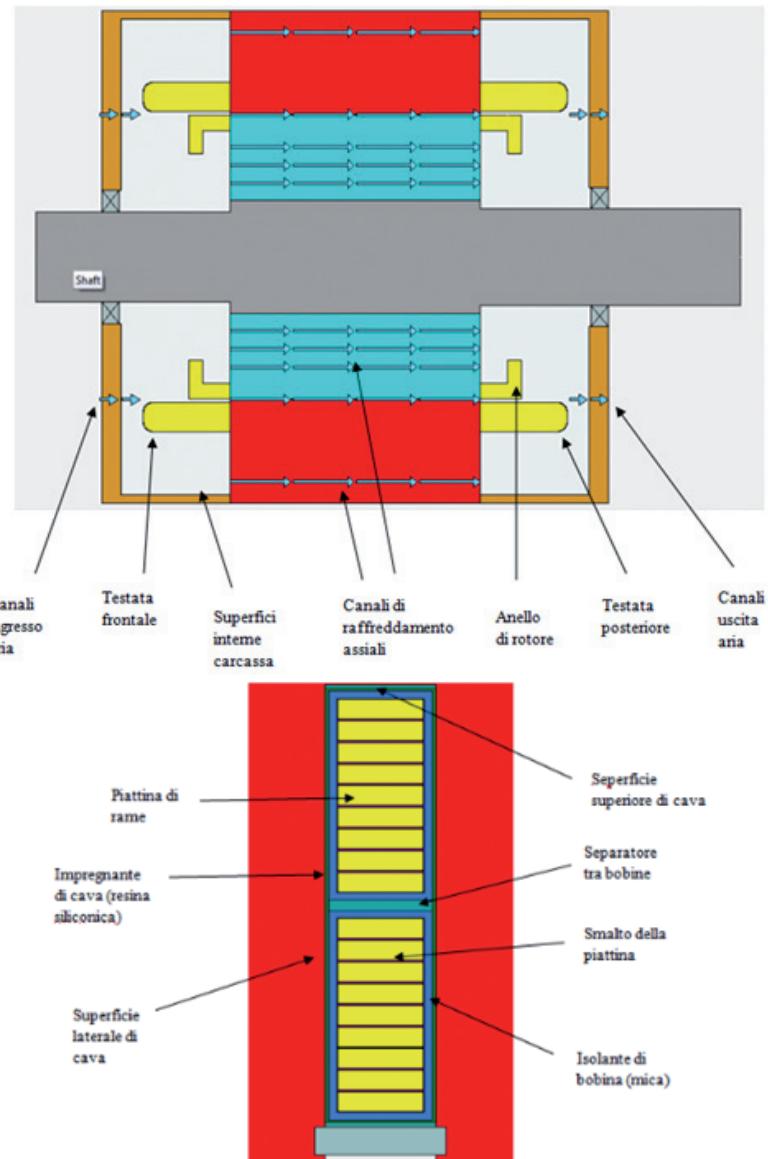


Fig. 11 - Geometria assiale del motore e geometria della cava statorica.
Fig. 11 - Axial engine geometry and geometry of the stator slot.

la base della ripartizione delle perdite, riferita ad una specifica condizione operativa del motore).

Si approfondisce ora il punto 1, ritenuto di maggior interesse.

Il valore della potenza all'albero è calcolato ottenendo

Simplification hypothesis: a modification of the equivalent circuit of asynchronous motor is made (fig. 14) and the torque equation is analysed.

From the modification shown in fig. 14 we can write the following torque equation:

SCIENZA E TECNICA

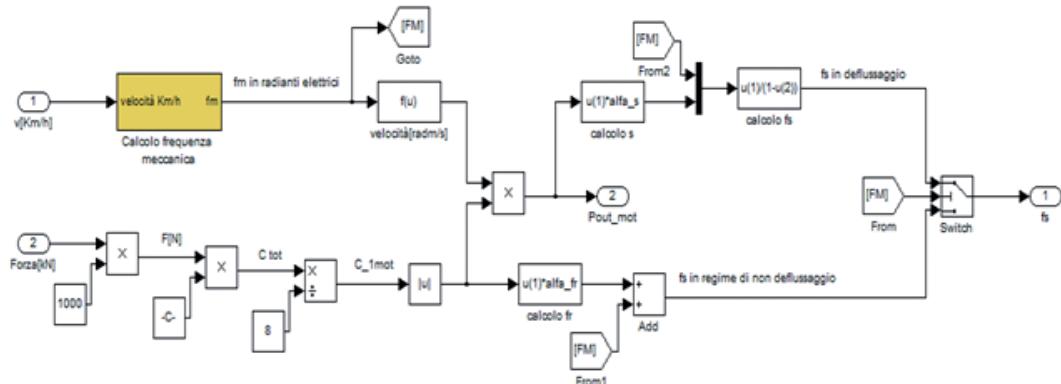


Fig. 12 - Schema rappresentante il calcolo della potenza all'albero e della frequenza statorica.
Fig. 12 - Diagram representing the calculation of the shaft power and stator frequency.

i valori di coppia e velocità angolare del motore dai valori dello sforzo di trazione e della velocità del treno. Il metodo implementato per il calcolo della frequenza statorica sia in regime nominale, sia in regime di deflussaggio, merita un approfondimento.

Calcolo della frequenza statorica in regime di flusso nominale

Ipotesi semplificativa: si suppone che la frequenza rotorica sia legata da una proporzionalità lineare alla coppia all'albero approssimando ad una retta il tratto discendente della caratteristica meccanica del motore asincrono (tale ipotesi è valida solamente in regime di non deflussaggio).

In fig.13 si nota la "linearizzazione" del tratto discendente delle caratteristiche meccaniche meccaniche in regime di flusso nominale.

Il coefficiente di proporzionalità tra coppia e frequenza rotorica è stato ricavato con i valori nominali delle stesse:

$$\alpha_{fr} = \frac{fr_{nom}}{C_{nom}}$$

dove:

- fr_{nom} = frequenza rotorica nominale in Hz;
- C_{nom} = coppia nominale in Nm.

Utilizzando questo metodo di calcolo si riesce ad ottenere la frequenza statorica dai valori di coppia e frequenza meccanica, infatti:

$$fs = fm + fr = fm + (C \cdot \alpha_{fr}) \text{ [Hz];}$$

Calcolo della frequenza statorica in regime di deflussaggio

Ipotesi semplificativa: si esegue una modifica del cir-

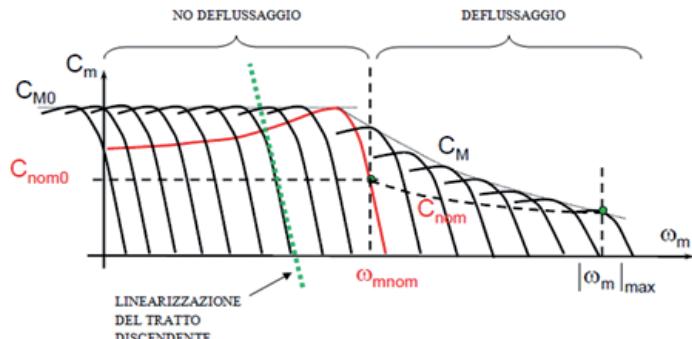


Fig. 13 - Caratteristiche meccaniche del motore al variare della frequenza di alimentazione.
Fig. 13 - Engine mechanical characteristics as the feeding frequency varies.

$$C = \frac{3 \cdot p \cdot Rr' \cdot V^2}{w \cdot s \cdot (Rs + \frac{Rr'^2}{s})^2 + (Xs + Xr')^2} \quad [1]$$

$$HP: (Rr'/s) \gg Rs, (Rr'/s) \gg (Xs + Xr') \quad [2]$$

With hypothesis [2] the torque equation is simplified as follows:

$$C = \frac{3 \cdot p \cdot Rr' \cdot V^2}{w \cdot s \cdot (\frac{Rr'}{s})^2}$$

$$C \cdot \omega = \frac{3 \cdot p \cdot V^2 \cdot s}{Rr'}$$

Finally I will have that:

$$s = K \cdot P$$

where:

- P = power delivered by the engine;
- K = coefficient of proportionality between running and power.

SCIENZA E TECNICA

cuito equivalente del motore asincrono (fig.14) e si analizza l'equazione della coppia.

Dalla modifica raffigurata in fig.14 si può scrivere la seguente equazione della coppia:

$$C = \frac{3 \cdot p \cdot Rr^l \cdot V^2}{w \cdot s \cdot (Rs + \frac{Rs^2}{s}) + (Xs + Xr^l)^2} [1]$$

$$HP \cdot (Rr^l / s) > Rs, (Rr^l / s) > (Xs + Xr^l) [2]$$

Con l'ipotesi [2] l'equazione della coppia si semplifica nel seguente modo:

$$C = \frac{3 \cdot p \cdot Rr^l \cdot V^2}{w \cdot s \cdot (\frac{Rs^2}{s})^2}$$

$$C \cdot \omega = \frac{3 \cdot p \cdot V^2 \cdot s}{Rr^l}$$

infine avrò che:

$$s = K \cdot P$$

dove:

- P = potenza erogata dal motore;
- K = coefficiente di proporzionalità tra scorrimento e potenza.

In conclusione, dopo tali approssimazioni si ottiene una proporzionalità diretta tra scorrimento e potenza all'albero. Il coefficiente di proporzionalità è stato ricavato utilizzando i valori nominali delle grandezze:

$$K = s_{\text{nom}} / P_{\text{nom}}$$

Quindi dai valori della potenza resa si ricava lo scorrimento e di conseguenza, con la frequenza meccanica si ottiene la frequenza di statore:

$$fs = fm / (1-s); [\text{Hz}]$$

4.5. Gruppo di conversione

In tale paragrafo è descritto il modello relativo al gruppo di conversione. In particolare si analizzano l'inverter e il convertitore di 1° stadio. Il software scelto per l'implementazione è l'ambiente "SIMULINK" di "MATLAB".

4.5.1. Rete termica

In fig. 15 è possibile notare la struttura della rete termica dei convertitori (inverter e convertitore di 1° stadio).

Tuttavia, nella rete è stata considerata anche la potenza dissipata dal chopper ausiliari e dalle relative induttanze di livellamento poi-

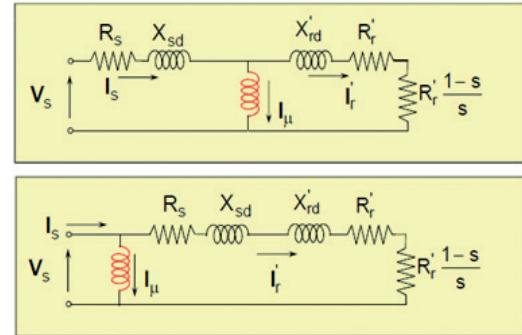


Fig. 14 - Modifica al circuito equivalente del motore asincrono.
Fig. 14 - Modification to the equivalent circuit of the induction motor.

In conclusion, after such approximations a direct proportionality is obtained between running and shaft power. The coefficient of proportionality was obtained using the nominal values of the magnitudes:

$$K = s_{\text{nom}} / P_{\text{nom}};$$

Therefore from the values of the power yield we obtain the running and consequently, with the mechanical frequency the stator frequency is obtained:

$$fs = fm / (1-s); [\text{Hz}]$$

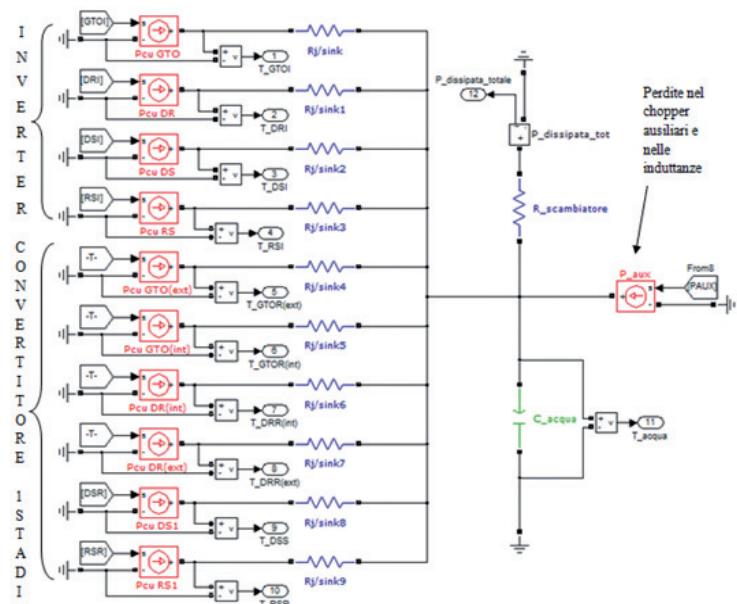


Fig. 15 - Rete termica del gruppo di conversione.
Fig. 15 - Conversion group thermal network.

SCIENZA E TECNICA

ché anch'essi sono interessati dal circuito di raffreddamento del gruppo di conversione. Un'altra fondamentale caratteristica di tale rete, è quella di riuscire a rappresentare, da un punto di vista termico, entrambe le configurazioni del convertitore di 1° stadio. Nel fare ciò, si tiene conto delle differenti sollecitazioni alle quali sono sottoposte le giunzioni degli 8 GTO del convertitore al variare del tipo di configurazione del convertitore.

Nella tabella 3 sono descritti i parametri circuituali della rete termica del gruppo di conversione.

4.5. Conversion group

The model relating to the conversion group is described in this paragraph. In particular, the inverter and 1st stage converter are analysed. The software chosen for implementation is the "SIMULINK" environment of "MATLAB".

4.5.1. Thermal network

In fig. 15 we can see the structure of the converters thermal network (inverters and 1st stage converter). However, in the network the power dissipated by the auxiliary chopper

TABELLA 3 – TABLE 3

PARAMETRI CIRCUITALI DELLA RETE TERMICA DEL GRUPPO DI CONVERSIONE
CIRCUIT PARAMETERS OF THE THERMAL NETWORK OF THE CONVERSION GROUP

Parametro - Parameter	Significato - Meaning
Rj/sink <i>R_j/sink</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni dei 6 GTO dell'inverter e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of 6 GTO of the inverter and cooling fluid</i>
Rj/sink1 <i>R_j/sink1</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni dei 6 diodi di ricircolo dell'inverter e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of the 6 diodes of the inverter recirculation and the cooling fluid</i>
Rj/sink2 <i>R_j/sink2</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni dei 6 diodi di snubber dell'inverter e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of the 6 snubber diodes of the inverter and the cooling fluid</i>
Rj/sink3 <i>R_j/sink3</i>	Resistenza termica globale tra le 3 resistenze di snubber dell'inverter e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the 3 snubber resistances of the inverter and the cooling fluid</i>
Rj/sink4 <i>R_j/sink4</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni dei 4 GTO più sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of the 4 GTO more thermally stressed of 1st stage converter and cooling fluid</i>
Rj/sink5 <i>R_j/sink5</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni dei 4 GTO meno sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of the 4 GTO less thermally stressed of 1st stage converter and cooling fluid</i>
Rj/sink6 <i>R_j/sink6</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni dei 4 diodi di ricircolo più sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of the 4 recirculation diodes more thermally stressed of 1st stage converter and cooling fluid</i>
Rj/sink7 <i>R_j/sink7</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni dei 4 diodi di ricircolo meno sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of the 4 recirculation diodes less thermally stressed of 1st stage converter and cooling fluid</i>
Rj/sink8 <i>R_j/sink8</i>	Resistenza termica globale tra le giunzioni degli 8 diodi di snubber del convertitore di 1° stadio e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the junctions of the 8 snubber diodes of 1st stage converter and cooling fluid</i>
Rj/sink9 <i>R_j/sink9</i>	Resistenza termica globale tra le 4 resistenze di snubber del convertitore di 1° stadio e il fluido di raffreddamento <i>Overall thermal resistance between the 4 snubber resistances of 1st stage converter and cooling fluid</i>
R_scambiatore <i>R_{exchanger}</i>	Resistenza termica tra fluido di raffreddamento e aria, (tale resistenza rappresenta lo scambiatore di calore del circuito di raffreddamento del gruppo convertitori) <i>Thermal resistance between cooling fluid and air (this resistance represents the heat exchanger of the cooling circuit of the converter group)</i>
C_acqua <i>C_{water}</i>	Capacità termica dell'intera massa di fluido refrigerante contenuta nel circuito di raffreddamento del gruppo convertitori <i>Thermal capacity of the entire mass of refrigerant fluid contained in the cooling circuit of the converter group</i>
Pcu GTO <i>P_{cu} GTO</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 6 giunzioni dei GTO dell'inverter <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 6 joints of inverter GTOs</i>
Pcu DR <i>P_{cu} DR</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 6 giunzioni dei diodi di ricircolo dell'inverter <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 6 recirculation diodes junctions of the inverter</i>

(Continua)

SCIENZA E TECNICA

(Segue) TABella 3 – TABLE 3

Pcu DS <i>Pcu DS</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 6 giunzioni dei diodi di snubber <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 6 snubber recirculation diodes</i>
Pcu RS <i>Pcu RS</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 3 resistenze di snubber <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 3 snubber resistances</i>
Pcu GTO(ext) <i>Pcu GTO(ext)</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 4 giunzioni dei GTO più sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 4 junctions of GTO more thermally stressed of 1st stage converter</i>
Pcu GTO(int) <i>Pcu GTO(int)</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 4 giunzioni dei GTO meno sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 4 junctions of GTO less thermally stressed of 1st stage converter</i>
Pcu DR(int) <i>Pcu DR(int)</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 4 giunzioni dei diodi di ricircolo più sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 4 junctions of recirculation diodes more thermally stressed of 1st stage converter</i>
Pcu DR(ext) <i>Pcu DR(ext)</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 4 giunzioni dei diodi di ricircolo meno sollecitati termicamente del convertitore di 1° stadio <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 4 junctions of recirculation diodes less thermally stressed of 1st stage converter</i>
Pcu DS1 <i>Pcu DS1</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 8 giunzioni dei diodi di snubber del convertitore di 1° stadio <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 8 junctions of snubber diodes of 1st stage converter</i>
Pcu RS1 <i>Pcu RS1</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle 4 resistenze di snubber del convertitore di 1° stadio <i>Thermal power generator representative of joule losses in the 4 snubber resistances of 1st stage converter</i>

I parametri circuituali trattati, in particolare le resistenze termiche tra le giunzioni dei componenti elettronici e il fluido refrigerante sono calcolati sfruttando dati derivanti da prove di laboratorio sul sistema di propulsione. In particolare, dalle coppie di valori della potenza dissipata dalla giunzione e del salto termico giunzione/fluido refrigerante (entrambe rilevate dalle prove) si ricava il valore della resistenza termica con la nota relazione:

$$R_{giunzione/fluido} = (\Delta T_{giunzione/fluido}) / (P_{dissipata/giunzione})$$

4.5.2. Calcolo delle perdite

I generatori di potenza termica rappresentati in fig.15 si riferiscono alle perdite sulle varie giunzioni degli interruttori elettronici dell'inverter e del convertitore di 1° stadio. In "SIMULINK", è stato realizzato uno specifico sottosistema adibito al calcolo di tali perdite, rappresentato in fig.16.

Occorre specificare che il metodo di calcolo delle perdite implementato in fig. 16 tiene conto di come variano le sollecitazioni termiche sulle giunzioni del convertitore di 1° stadio al variare della configurazione di funzionamento di quest'ultimo (raddrizzatore/chopper). Per una descrizione tecnica più dettagliata sul funzionamento del convertitore 4Q si rimanda a [2]. Ora si descrive, in maniera sintetica, l'impostazione del metodo di calcolo delle perdite nelle giunzioni dell'inverter.

and its levelling inductance was also considered because they too are affected by the cooling circuit of the conversion group. Another important feature of this network is to be able to represent both configurations of the 1st stage converter, from a thermal point of view. In doing so, account shall be taken of the various stresses to which the joints of 8 GTO of the converter are subjected as the converter configuration type varies.

Circuit parameters under study, in particular the thermal resistances between the joints of electronic components and the refrigerant are calculated using data from laboratory tests on the propulsion system.

In particular, from the torque values of the power dissipated by the joint and joint/refrigerant heat jump (both taken from the tests) the thermal resistance value can be obtained with the known relation:

$$R_{joint/fluid} = (\Delta T_{joint/fluid}) / (P_{dissipated/joint})$$

4.5.2. Calculation of losses

Thermal power generators shown in fig. 15 refer to losses on various joints of electronic switches of the inverter and 1st stage converter. A specific subsystem used to calculate such losses was created in "SIMULINK", shown in fig. 16.

We must specify that the loss calculation method implemented in fig. 16 takes into account how thermal stresses on the joints of the 1st stage converter vary as the operation configuration of the latter (rectifier/chopper) varies. For a

SCIENZA E TECNICA

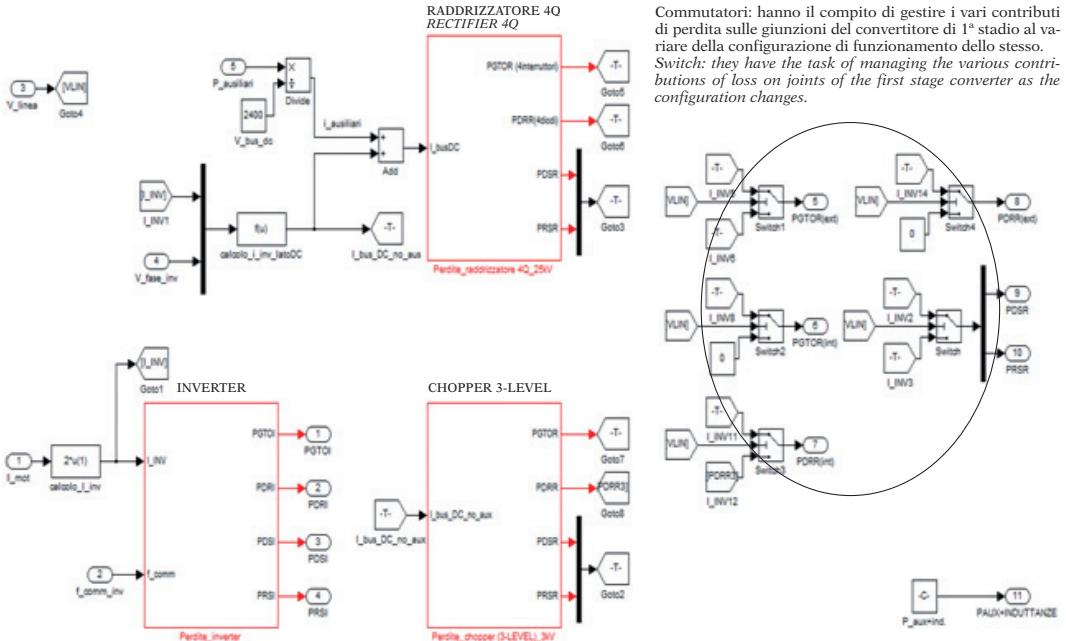


Fig. 16 - Sottosistemi adibiti al calcolo delle perdite nel gruppo di conversione.
Fig. 16 - Subsystems used for the calculation of losses in the conversion group.

A rigore, la relazione teorica che esprime le perdite in un generico interruttore elettronico è la seguente:

$$P = P_{cond} + P_{comm} = \delta \cdot \Delta v \cdot I + f_c \cdot k \cdot V \cdot I \cdot 2 \cdot t_{comm}$$

dove: P_{cond} = perdite di conduzione; P_{comm} = perdite di commutazione; δ = duty cycle dell'interruttore; Δv = caduta di tensione sull'interruttore durante la conduzione; I = corrente di conduzione; f_c = frequenza di commutazione; k = parametro; V = tensione ai capi dell'interruttore durante l'interdizione; t_{comm} = tempo che impiega l'interruttore a commutare.

Tuttavia, è una relazione molto complessa e sensibile agli eventuali errori commessi sulla stima dei parametri che la caratterizzano. Allora, pur con qualche approssimazione, si decide di utilizzare un'altra relazione semplificata:

$$P = P_{cond} + P_{comm} = K_1 \cdot I + K_2 \cdot f_c$$

In pratica si suppone che una quota delle perdite di giunzione (relativa alle perdite di conduzione) sia proporzionale alla corrente efficace erogata dall'inverter e la restante parte (relativa alle perdite di commutazione) sia proporzionale alla frequenza di commutazione dello stesso. In questo modo si esprime la potenza dissipata sulla giunzione in funzione di due variabili facilmente ricavabili da quelle disponibili in input e fornite dal simulatore

more detailed technical description on the operation of the 4Q converter see [2]. We shall now synthetically describe the method of calculation of losses in the inverter joints.

Strictly speaking, the theoretical relation that expresses the loss in a generic electronic switch is as follows:

$$P = P_{cond} + P_{comm} = \delta \cdot \Delta v \cdot I + f_c \cdot k \cdot V \cdot I \cdot 2 \cdot t_{comm}$$

where:

P_{cond} = conduction losses;

P_{comm} = switching losses;

δ = duty cycle of the switch;

Δv = voltage drop on the switch during conduction.

I = conduction current;

f_c = switching frequency;

k = parameter;

V = voltage at the switch ends during interdiction;

t_{comm} = time the switch takes to commute.

However, it is a very complex relation and sensitive to any mistakes on the estimation of parameters that characterise it. Now, although with some approximation, we decide to use another simplified relation:

$$P = P_{cond} + P_{comm} = K_1 \cdot I + K_2 \cdot f_c$$

di tratta. I coefficienti K_1 e K_2 sono stimati attraverso una valutazioni di dati derivanti da prove di laboratorio condotte sul sistema di propulsione. Per quanto riguarda il calcolo delle perdite nel convertitore di 1° stadio si utilizza la seguente relazione semplificata:

$$P = K_3 \cdot I$$

L'utilizzo della relazione è giustificato dal fatto che il convertitore lavora ad una frequenza di commutazione costante (250/260 Hz) durante il funzionamento del sistema di propulsione, perciò è lecito esprimere le perdite di giunzione in funzione della sola corrente di conduzione.

4.6. Trasformatore

In tale paragrafo è descritto il modello del trasformatore di trazione. Il software scelto per l'implementazione è ancora l'ambiente "SIMULINK" di "MATLAB".

4.6.1. Rete termica

In fig. 17 è rappresentata la rete termica del trasformatore monofase di trazione. È necessario specificare che tale rete è in grado di rappresentare da un punto di vista termico entrambe le configurazioni operative del trasformatore, ovvero sia con catenaria in 25 kV c.a. sia con catenaria in 3 kV c.c..

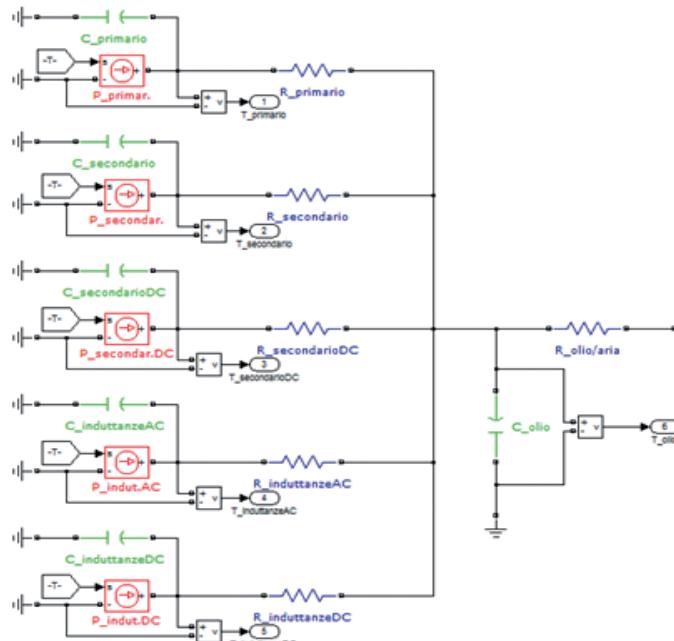


Fig.17 - Rete termica del trasformatore.
Fig.17 - Thermal network of the transformer.

We assume that a portion of joint losses (with respect to conduction losses) is proportional to the effective current supplied by the inverter and the remainder (concerning switching losses) is proportional to the switching frequency of the same. This expresses the power dissipated on the joint according to two variables that can be easily derived from those available in input and provided by the section simulator. The coefficients K_1 and K_2 are estimated through an evaluation of data from laboratory tests conducted on the propulsion system. As regards the calculation of losses in the 1st stage converter the following simplified relation is used:

$$P = K_3 \cdot I$$

The use of the relation is justified by the fact that the converter operates at a constant switching frequency (250/260 Hz) during the operation of the propulsion system, so it is right to express joint losses as a function of current conduction only.

4.6. Transformer

This paragraph describes the model relating to the traction transformer. The software chosen for implementation is again the "SIMULINK" environment of "MATLAB".

4.6.1. Thermal network

Fig. 17 shows the thermal network of the single-phase traction transformer. It is necessary to specify that such a network can represent both operational transformer configurations from a thermal point of view, both with 25 kV AC catenary and with 3 kV DC catenary.

Table 4 shows circuit parameters of the transformer thermal net.

The above circuit parameters, in particular the thermal resistances between the generic copper winding and the transformer oil are estimated through specific laboratory thermal testing conducted on the transformer. In a process similar to that seen for the conversion group (calculation of resistances between joints and refrigerant) we have:

$$R_{winding/oil} = (\Delta T_{winding/oil}) / (P_{dissipated/winding})$$

It should be noted that the value of the oil temperature taken as reference corresponds to the average one; while the temperature of the winding is the one measured by precise optical fibre in laboratory tests.

4.6.2 – Calculation of losses

Thermal power generators shown in fig. 17 refer to losses in the different windings of the transformer. A specific

SCIENZA E TECNICA

Nella tabella 4 sono descritti i parametri circuitali della rete termica del gruppo di conversione.

I parametri circuitali appena visti, in particolare le resistenze termiche tra il rame del generico avvolgimento e

subsystem used to calculate such losses was created in "SIMULINK", shown in fig. 18.

At this point we must analyse the loss calculation method on the generic internal winding of the transformer. The well-

TABELLA 4 – TABLE 4

PARAMETRI CIRCUITALI DELLA RETE TERMICA DEL TRASFORMATORE
CIRCUIT PARAMETERS OF THE TRANSFORMER THERMAL NETWORK

Parametro - Parameter	Significato - Meaning
R_primario <i>R_primary</i>	Resistenza termica data dalla serie tra resistenza termica dell'isolante dell'avvolgimento primario e resistenza termica di convezione nelle superfici a contatto con l'olio <i>Thermal resistance of the series between the winding insulation thermal resistance and thermal convection resistance in the surfaces in contact with the oil</i>
R_secondario <i>R_secondary</i>	Resistenza termica data dalla serie tra resistenza termica dell'isolante degli avvolgimenti secondari di trazione e resistenza termica di convezione nelle superfici lambite dall'olio <i>Thermal resistance given by the thermal resistance series of traction secondary windings insulation and thermal convection resistance in the oil lapped surfaces</i>
R_secondario DC <i>R_secondary DC</i>	Resistenza termica data dalla serie tra resistenza termica dell'isolante degli avvolgimenti secondari aggiuntivi (utilizzati come filtro lato rete in configurazione 3 kV c.c.) e resistenza termica di convezione nelle superfici lambite dall'olio <i>Thermal resistance given by the thermal resistance series of additional secondary windings insulation (used as network side filter in 3 kV DC configuration) and thermal convection resistance in the oil lapped surfaces</i>
R_induttanze AC <i>R_inductances AC</i>	Resistenza termica data dalla serie tra resistenza termica dell'isolante degli avvolgimenti delle induttanze utilizzate in entrambe le configurazioni (3 kV e 25 kV), e resistenza termica di convezione nelle superfici lambite dall'olio <i>Thermal resistance given by the thermal resistance series of inductances secondary windings insulation used in both configurations (3kV and 25 kV), and thermal convection resistance in the oil lapped surfaces</i>
R_induttanze DC <i>R_inductances DC</i>	Resistenza termica data dalla serie tra resistenza termica dell'isolante degli avvolgimenti delle induttanze utilizzate solo in configurazione 3 kV c.c. (utilizzate per accoppiare il chopper 3-level al bus dc dell'inverter) e resistenza termica di convezione nelle superfici lambite dall'olio <i>Thermal resistance given by the thermal resistance series of inductances secondary windings insulation used only in 3 kV DC configuration (used to pair the 3-level chopper with the inverter dc bus) and thermal convection resistance in oil lapped surfaces</i>
R_olio/aria <i>R_oil/air</i>	Resistenza termica globale dei due scambiatori di calore (olio/aria) riferita al salto termico tra la temperatura media dell'olio lungo lo scambiatore e la temperatura dell'aria in ingresso dello stesso <i>Overall thermal resistance of the two heat exchangers (air/oil) referring only to the thermal head between the average temperature of the oil along the heat exchanger and air inlet temperature of the same</i>
C_primario <i>C_primary</i>	Capacità termica del rame dell'avvolgimento primario <i>Copper thermal capacity of the primary winding</i>
C_secondario <i>C_secondary</i>	Capacità termica del rame degli avvolgimenti secondari di trazione <i>Thermal copper capacity of traction secondary windings</i>
C_secondario DC <i>C_secondary DC</i>	Capacità termica del rame degli avvolgimenti secondari aggiuntivi utilizzati in c.c. <i>Thermal copper capacity of additional secondary windings used in d.c.</i>
C_induttanze AC <i>C_inductances AC</i>	Capacità termica del rame delle induttanze utilizzate in entrambe le configurazioni (3kV e 25 kV) <i>Thermal copper capacity of inductances used in both configurations (3kV and 25 kV)</i>
C_induttanze DC <i>C_inductances DC</i>	Capacità termica del rame delle induttanze utilizzate solo in configurazione 3 kV c.c. <i>Thermal copper capacity of inductances used only in 3 kV DC configuration</i>
C_olio <i>C_oil</i>	Capacità termica dell'olio contenuto nell'intero circuito di raffreddamento del trasformatore <i>Thermal capacity of the oil contained in the entire cooling circuit of the transformer</i>
P_primario <i>P_primary</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nell'avvolgimento primario <i>Thermal power generator representative of joule losses in the primary winding</i>
P_secondario <i>P_secondary</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule negli avvolgimenti secondari di trazione <i>Thermal power generator representative of joule losses in traction secondary windings</i>
P_secondario DC <i>P_secondary DC</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule negli avvolgimenti aggiuntivi utilizzati in configurazione 3 kV c.c. <i>Thermal power generator representative of joule losses in additional windings used in 3 kV DC configuration</i>
P_induttanze AC <i>P_inductances AC</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle induttanze utilizzate in entrambe le configurazioni <i>Thermal power generator representative of joule losses in inductances used in both configurations</i>
P_induttanze DC <i>P_inductances DC</i>	Generatore di potenza termica rappresentante le perdite joule nelle induttanze utilizzate solamente in configurazione 3 kV c.c. <i>Thermal power generator representative of joule losses in inductances used only in 3 kV DC configuration</i>

SCIENZA E TECNICA

l'olio del trasformatore sono stimate attraverso specifiche prove termiche di laboratorio condotte sul trasformatore. Con un procedimento analogo a quello visto per il gruppo di conversione (calcolo delle resistenze tra giunzioni e fluido refrigerante) si ha:

$$R_{avvolgimento/olio} = (\Delta T_{avvolgimento/olio}) / (P_{dissipata/avvolgimento})$$

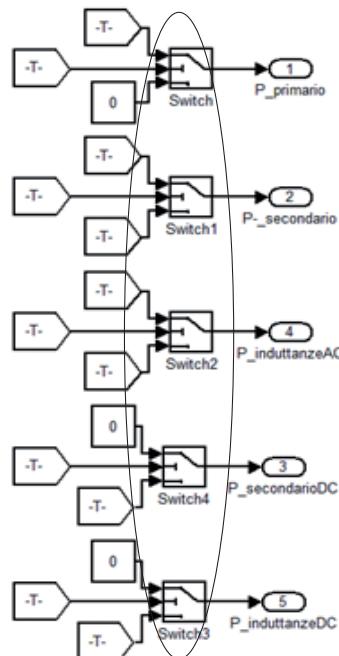
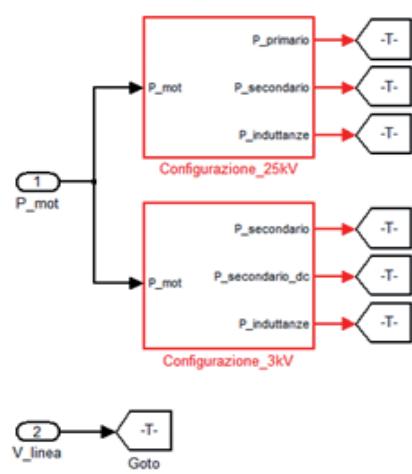
Va precisato che il valore di temperatura dell'olio presa come riferimento corrisponde a quella media; mentre la temperatura dell'avvolgimento è quella rilevata dalla fibre ottiche puntuali nelle prove di laboratorio.

4.6.2 – Calcolo delle perdite

I generatori di potenza termica rappresentati in fig.17 si riferiscono alle perdite nei vari avvolgimenti del trasformatore. In "SIMULINK", è stato realizzato uno specifico sottosistema adibito al calcolo di tali perdite, rappresentato in fig.18.

A questo punto è necessario analizzare l'impostazione del metodo di calcolo delle perdite sul generico avvolgimento interno del trasformatore. La relazione teorica, ben nota, che esprime le perdite joule in regime armonico su un conduttore ohmico è la seguente:

$$P_{joule} = R_1 \cdot I_{1eff}^2 + R_2 \cdot I_{2eff}^2 + R_3 \cdot I_{3eff}^2 + \dots + R_n \cdot I_{neff}^2 + \dots$$



Comutatori: essi hanno il compito di gestire i contributi di perdita sui molteplici avvolgimenti interni del trasformatore al variare della configurazione di funzionamento dello stesso.
Switch: they are responsible for managing the contributions of loss on multiple internal windings of the transformer at different operating configurations of the same

Fig.18 - Sottosistemi adibiti al calcolo delle perdite nel trasformatore.
Fig. 18 - Subsystems used for calculation of transformer losses.

SCIENZA E TECNICA

dove “ $R_1, R_2, \dots, R_n, \dots$ ” sono i valori delle resistenze del conduttore alle varie armoniche e “ $I_{1\text{eff}}, I_{2\text{eff}}, \dots, I_{n\text{eff}}, \dots$ ” sono i valori efficaci delle correnti armoniche circolanti sul conduttore stesso. Se si applicasse a rigore tale relazione sarebbe necessario tenere conto della variazione della resistenza con la temperatura e con la frequenza delle correnti circolanti, inoltre sarebbe necessario conoscere con precisione i valori delle varie componenti armoniche della corrente su ogni avvolgimento. Queste operazioni complicherebbero significativamente l'implementazione del modello e si rischierebbe di ottenere risultati non attendibili, dovuti a probabili errori sulla stima delle varie componenti armoniche. Allora per il calcolo delle perdite sul generico avvolgimento si decide di utilizzare la seguente relazione approssimata:

$$P_{\text{joule}} = K_1 \cdot I_{\text{eff}}^2$$

Con essa si considera solamente la corrente di 1ª armonica e inoltre si suppone il valore di resistenza “ K_1 ” costante al variare della temperatura dell'avvolgimento. Seppur si introducono alcune approssimazioni, la relazione utilizzata risulta abbastanza rappresentativa delle situazioni reali di funzionamento della macchina poiché nel profilo di tratta le temperature medie degli avvolgimenti si avvicinano a quelle nominali. Il coefficiente “ K_1 ”, ovvero il valore di resistenza che si considera è calcolato considerando i dati di specifica del trasformatore e si riferisce perciò alle condizioni operative nominali. Mentre la corrente di 1ª armonica del generico avvolgimento è stimata in funzione della potenza erogata dai motori di trazione e perciò si ha:

$$I_{\text{eff}} = K_2 \cdot P_{\text{mot}}$$

dove “ P_{mot} ” è la potenza erogata all'albero dal singolo motore. Il coefficiente di proporzionalità “ K_2 ” è stimato sulla base dei dati di specifica riferiti alle condizioni operative nominali del sistema di propulsione. La scelta di utilizzare tale relazione per determinare le correnti sugli avvolgimenti del trasformatore è fondata sul fatto che le tensioni a monte e a valle del trasformatore rimangono pressoché costanti al variare delle condizioni operative del sistema di propulsione mentre le correnti sono influenzate dalla potenza richiesta dalla trazione. Inoltre la variabile “ P_{mot} ” è ottenibile direttamente dalle variabili fornite dal simulatore di tratta.

4.7. Interfaccia per i dati in input al simulatore termico

In questo paragrafo si analizza come sia stato realizzato il blocco in “SIMULINK” adibito all'interfaccia con i dati in input al modello. Un esempio di tali dati è fornito di seguito, in fig.19.

I dati rappresentati in fig. 19 costituiscono il risultato di un software che implementa un simulatore di tratta. Com'è possibile notare, ogni colonna si riferisce all'anda-

nominal ones. The “ K_1 ” coefficient that is the value of resistance that we consider is calculated considering the specific transformer data and therefore refers to nominal operating conditions. While the 1st harmonic current of the generic winding is estimated as a function of the power supplied by the traction engines and therefore we have:

$$I_{\text{eff}} = K_2 \cdot P_{\text{mot}}$$

where “ P_{mot} ” is the power supplied by the single engine to the shaft. The coefficient of proportionality “ K_2 ” is estimated on the basis of specific data relating to the nominal operating conditions of the propulsion system. The decision to use this relation to determine the currents on the windings of the transformer is based on the fact that voltages upstream and downstream of the transformer remain almost constant as the operating conditions of the propulsion system vary while the currents are influenced by the power required by traction. In addition the variable “ P_{mot} ” is obtainable directly from the variables provided by the route simulator.

4.7. Interface for input data to the thermal simulator

In this section we analyse how the block was created in “SIMULINK” used as interface with the input data to the model. An example of this data is provided below, in fig. 19.

The data shown in fig. 19 are the result of a software that implements a route simulator. As we can see, each column refers to the temporal trends of a given variable along the train's route. However not all variables are used in the model, since only the total force on rims, travel time, train speed and type of catenary voltage are required. Fig. 20 shows the block that manages the above-mentioned variables and allows obtaining other magnitudes directly interfaced with the various models from these.

Within the block in fig. 20 there are the under-blocks represented in fig. 21.

The subsystems shown in fig. 21 allow deriving the many variables required for various thermal models (motor, transformer, converters) for the calculation of losses from the input data. In particular, analysing fig. 20, we have:

Rim_force = total traction effort at locomotive's wheel rims;

V_phase_inv = phase voltage at inverter output (corresponds to the supply voltage of the motors);

V_line = catenary power supply voltage;

f_comm_inv = switching frequency in inverter GTO;

speed = train speed in km/h;

P_auxiliaries = power required by auxiliary loads to one of the two locomotive drives;

Is = current absorbed by a traction engine;

P_mot = power supplied by a traction engine.

We will now analyse in depth the method implemented for the calculation of the power supplied by the traction

SCIENZA E TECNICA

Id_Simulazione	Cod.Tipo Alim.	Desc.Alim.	Pendenza	Distlivello	Distanza	Località	Vel. Massima Treno	Vel. Transito	Tempo Perc.	Tempo Perc.	Acc	Forza cerchioni	Potenza	Energia
												e (kN)	(kW)	Absorbiata (kWh)
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,73	0	MILANO C.		30	0	0	00:00:00	0	41,58	0	0
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,73	200			30	29,06	45,02	00:00:45	0	9,18	73	9
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,73	400			30	29,06	69,79	00:01:09	0	9,15	72	9
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,73	600			30	29,06	94,56	00:01:34	0	9,15	72	10
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	800			30	29,06	119,34	00:01:59	0	9,15	72	10
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	900			30	29,06	135,44	00:02:15	0	9,15	72	11
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	1000			30	29,06	144,11	00:02:24	0	9,15	72	11
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	1100 Dev.U.Milano C.			60	29,06	156,49	00:02:36	0	9,15	72	11
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	1200			60	29,06	168,88	00:02:48	0	9,15	72	12
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	1400			60	29,06	193,85	00:03:13	0	9,15	72	12
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	1422 Inizio RS 4 Cod.			100	29,06	195,38	00:03:16	0	9,15	72	12
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	1600			100	41,52	215,15	00:03:35	0,223	182,3	2066	21
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,72	1630			100	43,95	217,89	00:03:37	0,222	181,45	2157	23
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,71	1711 P.B.A. P.343			100	48,58	224,02	00:03:44	0,218	179,38	2377	28
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,71	1800			100	53,48	230,29	00:03:50	0,215	177,38	2588	33
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,71	1930			100	58,82	238,55	00:03:58	0,21	174,81	2852	40
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,71	2000 Ospizio Km.2,000			115	62,92	242,66	00:04:02	0,208	173,56	2978	44
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,71	2200			115	70,88	253,42	00:04:13	0,202	170,38	3293	55
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,71	2400			115	77,86	253,1	00:04:23	0,197	167,62	3558	66
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,71	2600			115	84,11	271,99	00:04:31	0,193	165,18	3787	77
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,7	2900 S.Prot.Mi.Lamb.			115	89,8	280,27	00:04:40	0,188	162,97	3999	87
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,7	2930			115	93,25	285,38	00:04:45	0,185	161,54	4108	94
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,7	3000			115	95,04	288,05	00:04:48	0,184	160,95	4169	97
325309	1 3000 C.C.	-0,01	113,7	3200			115	99,9	295,44	00:04:55	0,181	159,09	4332	108
325309	1 3000 C.C.	-0,75	113,7	3290			115	101,98	298,85	00:04:58	0,179	158,3	4400	112
325309	1 3000 C.C.	-0,75	113,62	3400			115	104,45	302,49	00:05:02	0,177	155,33	4422	118

Fig. 19 - Dati in input descrittivi di una porzione della tratta "Milano-Napoli".

Fig. 19 - Input data describing a portion of the "Milan-Naples" route.

mento temporale di una determinata variabile lungo la tratta del treno. Tuttavia non tutte le variabili a disposizione sono utilizzate nel modello, poiché sono sufficienti solamente la forza totale ai cerchioni, il tempo di percorrenza, la velocità del treno e il tipo di tensione di catenaria. In fig. 20 è rappresentato il blocco che gestisce le variabili sopracitate e consente di ottenere da esse altre grandezze direttamente interfacciabili con i vari modelli.

All'interno del blocco di fig. 21 vi sono i sotto-blocchi rappresentati in fig. 21.

I sottosistemi rappresentati in fig. 21 consentono di ricavare, dai dati in input, le molteplici variabili necessarie ai vari modelli termici (motore, trasformatore, convertitori) per il calcolo delle perdite. In particolare, analizzando la fig. 20, si ha:

Forza_cerchione = sforzo di trazione totale ai cerchioni di una locomotiva;

V_fase_inv = tensione di fase all'uscita dell'inverter (corrisponde alla tensione di alimentazione dei motori);

V_linea = tensione della catenaria di alimentazione;

f_comm_inv = frequenza di commutazione nei GTO dell'inverter;

velocità = velocità in km/h del treno;

P_ausiliari = potenza richiesta dai carichi ausiliari ad uno dei due azionamenti della locomotiva;

Is = corrente assorbita da un motore di trazione;

P_mot = potenza erogata da un motore di trazione.

motor and the method for calculating the current absorbed by the same.

The calculation of power delivered by the engine comes from the implementation of the following relation:

$$P = C_{mot} \cdot \omega_{mot} [W]$$

where:

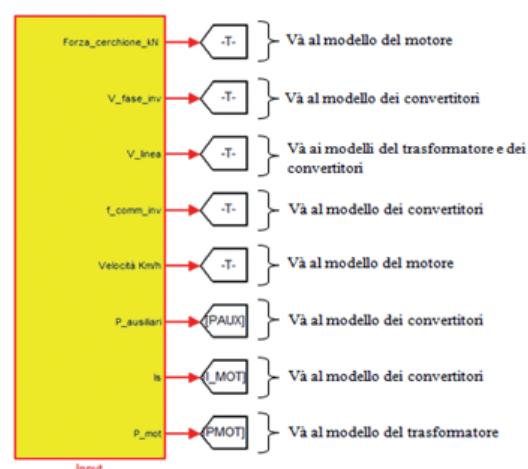


Fig. 20 - Blocco relativo all'inserimento dei dati in input.

Fig. 20 - Block relating to the entry of input data.

SCIENZA E TECNICA

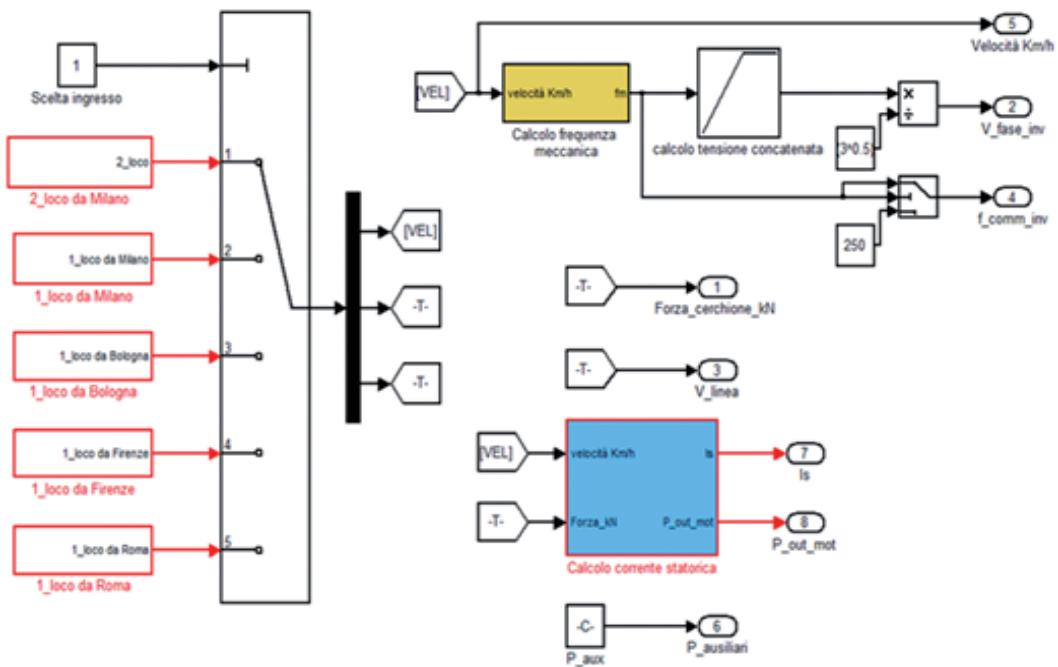


Fig. 21 - Sottosistemi adibiti alla gestione delle variabili fornite in input al simulatore.
Fig. 21 - Subsystems used for the management of variables provided in input to the simulator.

Si approfondisce ora il metodo implementato per il calcolo della potenza erogata dal motore di trazione e il metodo per il calcolo della corrente assorbita dallo stesso.

Il calcolo della potenza erogata dal motore deriva dall'implementazione della seguente relazione:

$$P = C_{\text{mot}} \cdot \omega_{\text{mot}} \quad [\text{W}]$$

dove:

C_{mot} = coppia all'albero del motore (ricavata facilmente dai valori di forza al cerchione in input) [Nm];

ω_{mot} = velocità dell'albero motore (ricavata facilmente dalla velocità del treno in input) [radm/s].

Il calcolo della corrente assorbita dal motore, invece, è stato effettuato assumendo alcune ipotesi semplificative. Analizzando il funzionamento del motore asincrono si deduce che la corrente magnetizzante ha un modesto valore rispetto al valore globale della corrente assorbita. Sulla base di ciò, ipotizziamo che la corrente statorica sia uguale a quella rotorica e quindi, dal circuito equivalente della macchina asincrona, si ha:

$$I_s = I_r^1 = \sqrt{\frac{P}{3 \cdot Rr^1 \cdot \frac{(1-s)}{s}}} \quad [\text{A}]$$

C_{mot} = torque at the motor shaft (easily derived from the force values at wheel rim in input) [Nm];

ω_{mot} = speed of the motor shaft (easily derived from the train speed in input) [radm/s].

The calculation of the current absorbed by the motor, however, was carried out assuming some simplification hypotheses. Analysing the operation of the asynchronous motor we can infer that the magnetising current has a modest value compared to the overall value of the current absorbed. On this basis, we assume that the stator current is equal to the rotor one and therefore, from the equivalent circuit of the asynchronous machine, we have:

$$I_s = I_r^1 = \sqrt{\frac{P}{3 \cdot Rr^1 \cdot \frac{(1-s)}{s}}} \quad [\text{A}]$$

where:

- P = power delivered by the engine;
- Rr^1 = rotor resistance referred to stator;
- s = engine running.

5. Model validation

This paragraph shows the validation procedures of the various models built, based on a comparison of tempera-

SCIENZA E TECNICA

dove:

- P = potenza erogata dal motore;
- Rr' = resistenza rotorica riferita a statore;
- s = scorrimento del motore.

5. Validazioni dei modelli

In tale paragrafo si illustrano le procedure di validazione dei vari modelli realizzati, basate su un confronto tra valori di temperatura forniti dalle simulazioni e valori di temperatura rilevati realmente nelle prove termiche di laboratorio. In particolare si effettua un confronto sui valori di temperatura riferiti al regime termico. Le prove di laboratorio (prove di tipo) considerate per le validazioni sono caratterizzate dal fatto di far funzionare il sistema di propulsione a condizioni operative ben definite e costanti lungo tutta la durata delle stesse prove. Chiaramente, per rendere coerenti i confronti tra valori di temperatura simulati e valori di temperatura sperimentali è necessario eseguire le simulazioni impostando in "SIMULINK" condizioni operative analoghe a quelle delle prove di laboratorio.

5.1. Motore

Nella tabella 5, sono esposti i dati relativi alle due prove termiche prese come riferimento per le validazioni del modello del motore.

Nelle presenti prove termiche sono state rilevate varie temperature, tuttavia, tra queste sono state selezionate solamente quelle confrontabili con le temperature fornite in uscita dal modello in SIMULINK. In particolare, per la prova termica "A" sono state considerate le seguenti:

- temperatura negli avvolgimenti della testata frontale (lato ingresso aria) (rilevata tramite un pirometro ad infrarosso);
- temperatura negli avvolgimenti della testata posteriore (lato uscita aria), (rilevata tramite un pirometro ad infrarosso);
- temperatura nel dente di statore (rilevata da una sonda di temperatura opportunamente posizionata all'interno del dente).

Mentre nella prova termica "B" è stata registrata solamente la temperatura nel dente di statore.

In conclusione si illustra, in tabella 6, il confronto dei valori di temperatura a regime per entrambe le prove.

Le lievi differenze riscontrate

ture values provided by simulations and actual measured temperature values in laboratory thermal tests. In particular, a comparison on temperature values referred to the thermal regime is made. Laboratory tests (type tests) considered for validations are characterised by the fact that they must operate the propulsion system in well-defined and constant operating conditions throughout the duration of these tests. Clearly, in order to make comparisons between simulated temperatures values and experimental temperature values consistent, simulations setting operating conditions similar to those of laboratory testing in "SIMULINK" must be made.

5.1. Motor

Table 5 shows the data of two thermal tests taken as reference for the validation of the engine model.

Various temperature were detected in these thermal tests, however, among these only those comparable with the temperatures given in output by the model in SIMULINK were selected. In particular, for "A" thermal testing the following were considered:

- the windings temperature of the front head (air inlet side) (detected by an infrared pyrometer);
- the windings temperature of the rear head (air outlet side) (detected by an infrared pyrometer);
- temperature in the stator tooth (detected by a temperature probe suitably positioned inside the tooth).

While for "B" thermal testing only the temperature in

TABELLA 5 – TABLE 5

PROVE TERMICHE DI TIPO SUL MOTORE
THERMAL TYPE TESTS ON THE ENGINE

Grandezze <i>Magnitudes</i>	Prova termica <i>Thermal Test</i> "A"	Prova termica <i>Thermal Test</i> "B"
Potenza assorbita <i>Absorbed power</i>	1210 kW	1221 kW
Frequenza di alimentazione <i>Supply frequency</i>	133 Hz	72 Hz
Potenza resa <i>Output power</i>	1130 kW	1162 kW
Tensione concatenata di alimentazione <i>Phase voltage supply</i>	1879 V	1870 V
Corrente di fase assorbita <i>Absorbed phase current</i>	421 A	418 A
Coppia all'albero <i>Shaft torque</i>	2740 Nm	5120 Nm
Rendimento <i>Efficiency</i>	0.93	0.95
Durata prova <i>Test duration</i>	8400 s	11880 s
Temperatura ambiente <i>External temperature</i>	26.1 °C	14.8 °C

sono dovute principalmente alle varie ipotesi semplificative adottate nella realizzazione del modello. Comunque è possibile confermare la validità del modello termico del motore poiché è stata verificata l'attendibilità dei risultati di simulazione per due condizioni operative differenti: una prima alla velocità massima del motore (133 Hz), una seconda alla velocità nominale (72 Hz).

5.2. Gruppo di conversione

Di seguito sono esposte le validazioni relative all'inverter e al convertitore di 1° stadio nella configurazione "raddrizzatore a 4 quadranti".

5.2.1. Inverter

Nella tabella 7, sono esposte le condizioni operative della prova termica di laboratorio presa come riferimento per la validazione del modello dell'inverter. La prova è condotta sul sistema di propulsione.

TABELLA 6 – TABLE 6

TABELLE RELATIVE AI CONFRONTI DI TEMPERATURA
TRA PROVE DI TIPO E SIMULAZIONI
TABLES RELATING TO TEMPERATURE COMPARISONS BETWEEN
TYPE TESTS AND SIMULATIONS

Prova termica "A" <i>Thermal Test "A"</i>	Temperature modello [°C] <i>Model Temperature</i> [°C]	Temperature prova termica "A" [°C] <i>Thermal Test</i> <i>Temperature "A"</i> [°C]
T_dente_statore <i>T_stator_tooth</i>	203	204
T_testata_frontale <i>T_front_head</i>	144	142
T_testata_posteriore <i>T_rear_head</i>	175	173
Prova termica "B" <i>Thermal Test</i> "B"	Temperature modello [°C] <i>Model Temperature</i> [°C]	Temperature prova termica "B" [°C] <i>Thermal Test</i> <i>Temperature "B"</i> [°C]
T_dente_statore <i>T_stator_tooth</i>	139	137

the stator tooth was recorded. In conclusion, table 6 illustrates the comparison of regime temperature values for both tests.

TABELLA 7 – TABLE 7

DATI DELLA PROVA TERMICA DI LABORATORIO SUL SISTEMA
DI PROPULSIONE
LABORATORY THERMAL TEST DATA ON THE PROPULSION SYSTEM

Grandezze <i>Magnitudes</i>	Valori <i>Values</i>
Potenza erogata inverter <i>Inverter power output</i>	1660 kW
Potenza assorbita ausiliari <i>Auxiliary absorbed power</i>	0 kW
Velocità <i>Speed</i>	114 km/h
Forza totale ai cerchioni <i>Total force on rims</i>	191 kN
Tensione di catenaria <i>Catenary voltage</i>	3 kV
Frequenza fondamentale inverter <i>Fundamental inverter frequency</i>	50 Hz
Tensione concatenata uscita inverter <i>Inverter output phase voltage</i>	1400 V
Frequenza di commutazione GTO <i>GTO switching frequency</i>	250 Hz
Corrente efficace uscita inverter <i>Inverter output RMS current</i>	790 A
Temperatura dell'aria in ingresso allo scambiatore di calore <i>Incoming air temperature at heat exchanger</i>	31.17 °C
Durata prova <i>Test duration</i>	14400 s

The slight differences are due primarily to various simplification assumptions adopted in the creation of the model. However, it is possible to confirm the validity of the motor thermal model since the reliability of simulation results for two different operating conditions was verified: the first at the maximum speed of the motor (133 Hz), the second at the rated speed (72 Hz).

5.2. Conversion group

Below are the validations relating to the inverter and 1st stage converter in "4-quadrant rectifier" configuration.

5.2.1. Inverter

Table 7 shows the operating conditions of the laboratory thermal test taken as reference for the validation of the inverter model. The test is conducted on the propulsion system, placing the locomotive on a roller bench.

In the thermal test, using appropriate thermocouples, temperatures

SCIENZA E TECNICA

sione, posizionando la locomotiva sul banco a rulli.

Nella prova termica, tramite l'utilizzo di opportune termocoppiie, sono state rilevate le temperature sui case dei componenti elettronici più critici, in particolare:

- temperatura del fluido refrigerante (in uscita dallo scambiatore di calore);
- temperatura giunzioni GTO;
- temperatura giunzioni diodi di ricircolo;
- temperatura giunzioni diodi di snubber;
- temperatura resistenze di snubber.

Nella tabella 8, è esposto il confronto tra temperature di prova e temperature di simulazione (entrambe riferite al regime termico).

Dalla tabella 8 è evidente un elevato accostamento tra temperature fornite dalla simulazione e temperature registrate nella prova termica, si può concludere perciò che il modello realizzato per l'inverter risulta valido.

5.2.2 - Convertitore di 1° stadio

In questo paragrafo è rappresentata la validazione del modello del convertitore di 1° stadio. La prova termica, presa come riferimento, si riferisce alla configurazione da raddrizzatore a 4 quadranti. La modalità di esecuzione della prova stessa è analoga a quella descritta per l'inverter e i relativi dati sono rappresentati in tabella 9.

Le temperature rilevate dalle termocoppiie sono della stessa tipologia di quelle rilevate per le validazioni dell'inverter.

Alla luce dei risultati rappresentati in tabella 10 è possibile confermare la validità del modello termico del convertitore di 1° stadio.

5.3. Trasformatore

In questo paragrafo è esposta la validazione del trasformatore di trazione. Di seguito, in tab.11, è illustrata

TABELLA 8 – TABLE 8

DATI DELLA PROVA TERMICA DI LABORATORIO SUL SISTEMA

DI PROPULSIONE

LABORATORY THERMAL TEST DATA ON THE PROPULSION SYSTEM

Confronto <i>Comparision</i>	Temperature prova termica [°C] <i>Thermal test temperatures [°C]</i>	Temperatura simulazione [°C] <i>Simulation temperatures [°C]</i>
T_{GTO} T_{GTO}	58.9	56.1
T_{diodi} ricircolo $T_{recirculation\ diodes}$	52.5	49.7
T_{diodi} snubber $T_{snubber\ diodes}$	50.9	48.1
$T_{resistenza}$ snubber $T_{snubber\ resistance}$	89.2	86.3
T_{fluido} refrigerante (out scambiatore) $T_{refrigerant}$ (out exchanger)	35.6	32.8

TABELLA 9 – TABLE 9

DATI RELATIVI ALLA PROVA TERMICA DI LABORATORIO

DATA ON LABORATORY THERMAL TEST

Grandezze <i>Magnitudes</i>	Valori <i>Values</i>
Potenza erogata inverter <i>Inverter power output</i>	2798 kW
Potenza assorbita ausiliari <i>Auxiliary absorbed power</i>	0 kW
Velocità <i>Speed</i>	274 km/h
Forza totale ai cerchioni <i>Total force on rims</i>	134.7 kN
Tensione di catenaria <i>Catenary voltage</i>	25 kV
Frequenza fondamentale inverter <i>Fundamental inverter frequency</i>	120 Hz
Tensione concatenata uscita inverter <i>Inverter output phase voltage</i>	1870 V
Frequenza di commutazione GTO <i>GTO switching frequency</i>	250 Hz
Temperatura dell'aria in ingresso allo scambiatore di calore <i>Incoming air temperature at heat exchanger</i>	31.15 °C
Durata prova <i>Test duration</i>	1000 s

on the case of most critical electronic components were detected, in particular:

- temperature of the refrigerant (outgoing from the heat exchanger);
- GTO junctions temperature;
- recirculation diodes junctions temperature;
- snubber diodes junctions temperature;
- snubber resistances temperature.

SCIENZA E TECNICA

la prova di laboratorio presa come riferimento per il confronto con i risultati di simulazione.

La prova di laboratorio è effettuata sulla locomotiva posta sul banco a rulli. Le temperature nei vari avvolgimenti interni sono rilevate tramite sistemi di fibre ottiche puntuali e fibre ottiche continue.

Le temperature ottenibili dalla prova e utili al confronto con le temperature di simulazione sono le seguenti:

- temperatura media olio (data dalla media tra la temperatura dell'olio in uscita e dalla temperatura dell'olio in ingresso dello scambiatore);
- temperatura media avvolgimento primario (data dalla media tra le temperature registrate dalle varie fibre ottiche puntuali);

**CONFRONTO DI TEMPERATURE TRA PROVA DI LABORATORIO
E SIMULAZIONE**
**COMPARISON OF TEMPERATURES BETWEEN SIMULATION
AND LABORATORY TEST**

Confronto Comparision	Temperatura prova termica [°C] Thermal test temperatures [°C]	Temperatura simulazione [°C] Simulation temperatures [°C]
T_GTO T_GTO	55.4	52.9
T_diodi ricircolo T_recirculation diodes	74.8	72.1
T_diodi snubber T_snubber diodes	68.8	66
T_resistenza snubber T_snubber resistance	88.3	85.5
T_fluido refrigerante (out scambiatore) T_refrigerant (out exchanger)	36.8	34.4

TABELLA 11 – TABLE 11
DATI RELATIVI ALLA PROVA TERMICA DI LABORATORIO
DATA ON LABORATORY THERMAL TEST

Grandezze Magnitudes	Valori Values
Potenza assorbita trafo Transformer absorbed power	6120 kW
Velocità Speed	185 km/h
Tensione di catenaria Catenary voltage	25 kV
Corrente assorbita al primario del trafo Absorbed current at transformer primary	240 A
Sforzo totale ai cerchioni della locomotiva Total effort at locomotive wheel rims	85 kN
Durata prova Test duration	10800 s
Temperatura aria (ingresso torri di raffreddamento) Air temperature (cooling towers inlet)	30.7 °C

Table 8 shows the comparison between test temperatures and simulation temperatures (both related to the thermal regime).

It is clear from table 8 that there is a high combination of temperatures provided by the simulation and thermal test recorded temperatures, we can therefore conclude that the model created for the inverter is valid.

5.2.2 - 1st stage converter

This paragraph shows the validation of the 1st stage converter model. The thermal test, taken as reference, refers to the 4-quadrant rectifier configuration. The execution method of the same test is similar to that described for the inverter and its data are shown in table 9.

The temperatures detected by thermocouples are of the same type as those found for the validations of the inverter.

TABELLA 10 – TABLE 10

In the light of the findings presented in table 10 we can confirm the validity of the 1st stage converter thermal model.

5.3. Transformer

This paragraph shows the validation of the traction transformer. Table 11 below shows the laboratory test taken as reference for comparison with the results of the simulation.

Laboratory testing is done on the locomotive placed on a roller bench. Temperatures in the interior windings are detected by specific fibre optic systems and continuous fibre optics.

Temperatures obtainable from the test and useful for comparison with simulation temperatures are as follows:

- average oil temperature (given by the average of the outbound oil temperature and inbound oil temperature of the exchanger);
- Average primary winding temperature (given by the average of the temperatures recorded by various specific optical fibres);
- maximum secondary winding temperature (detected by continuous optical fibres);
- average temperature on the two inductances are used in both configurations (given by the average between the different temperatures measured by precise optical fibres).

SCIENZA E TECNICA

- temperatura massima avvolgimento secondario (rilevata dalle fibre ottiche continue);
- temperatura media sulle due induttanze utilizzate in entrambe le configurazioni (data dalla media tra le varie temperature rilevate dalle fibre ottiche puntuali).

La tabella 12 dimostra un elevato accostamento tra valori di temperatura sperimentali e valori di temperatura provenienti dalla simulazione, alla luce di ciò è possibile confermare la validità del modello termico realizzato per il trasformatore.

6. Simulazioni di tratta

A valle delle validazioni effettuate è possibile utilizzare il modello ai fini di simulare, in maniera realistica, la risposta delle sollecitazioni termiche nei principali elementi costruttivi del motore nel funzionamento del treno lungo una generica tratta. In particolare, in tale paragrafo ci si riferisce alla tratta "Milano-Napoli". Inoltre, si esegue un confronto tra il funzionamento del treno in condizioni normali (due locomotive attive) e il funzionamento in condizioni degradate (una locomotiva attiva) (es. fig. 22).

In particolare sono visualizzati due andamenti per ciascun grafico, riferiti a condizioni di funzionamento nominali (2 locomotive attive) (blu) e condizioni di funzionamento degradate (1 locomotiva attiva) (rosso). È evidente che in condizioni degradate la singola locomotiva è maggiormente sovraccaricata per far fronte alla mancanza di trazione nella locomotiva guasta. Come conseguenza, nel funzionamento in condizioni degradate si hanno maggiori sollecitazioni termiche sui componenti della catena di trazione. Questo fatto trova conferma, ad esempio, nella temperatura sul dente di statore del motore di trazione, rappresentata in fig. 22.

In fig. 23, nella quale è rappresentato il salto termico medio tra l'olio del trasformatore e l'aria ambiente, è evidente una maggior sollecitazione termica della macchina in condizioni degradate.

Nel tragitto "Firenze-Roma", ad esempio, si raggiungono i 250 km/h sia in condizioni normali sia in condizioni degradate, questo comporta però (nel funzionamento con una sola locomotiva attiva)

TABELLA 12 – TABLE 12
CONFRONTO DI TEMPERATURE TRA PROVA DI LABORATORIO
E SIMULAZIONE
COMPARISON OF TEMPERATURES BETWEEN SIMULATION
AND LABORATORY TEST

Confronto <i>Comparision</i>	Temperature prova termica [°C] <i>Thermal test temperatures [°C]</i>	Temperatura simulazione [°C] <i>Simulation temperatures [°C]</i>
T_primario <i>T_primary</i>	103	98.6
T_secondario <i>T_secondary</i>	133.3	129
T_induttanze <i>T_inductances</i>	96	91.6
T_olio media <i>T_average oil</i>	91.5	87

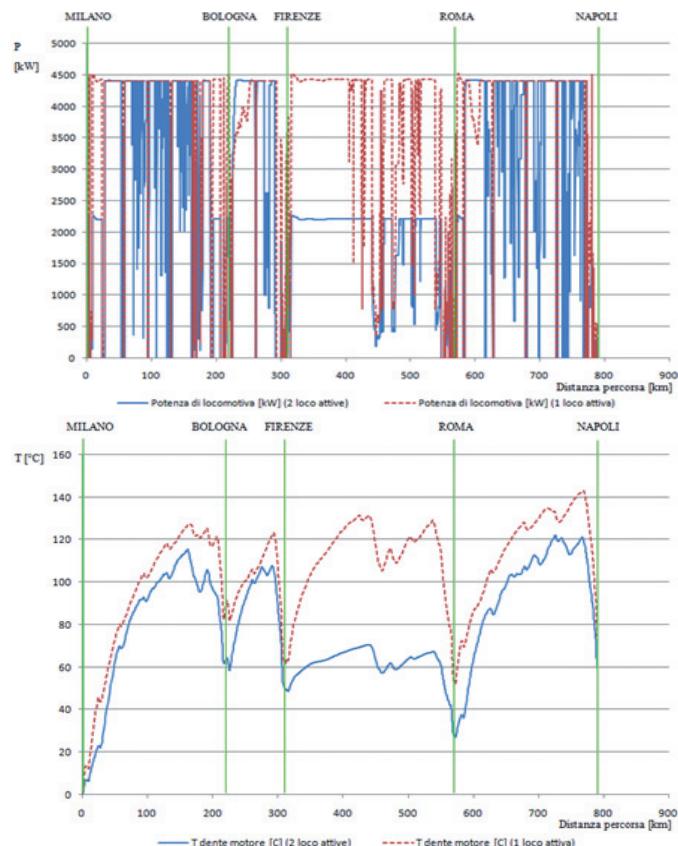


Fig. 22 - Andamenti della potenza di trazione della singola locomotiva e del salto termico tra dente di statore e aria ambiente in funzione della distanza percorsa.
Fig. 22 - Trends of the traction power of a single locomotive and thermal jump between stator teeth and ambient air according to the distance travelled.

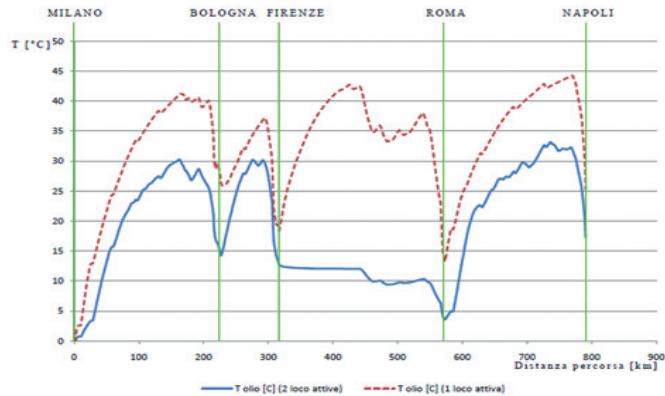


Fig. 23 - Andamenti del salto termico medio tra l'olio del trasformatore e l'aria ambiente al variare in funzione della distanza percorsa.

Fig. 23 - Trends of the average thermal jump between the transformer oil and the ambient air as it varies as a function of the distance travelled.

un notevole aumento delle perdite e un conseguente aumento della temperatura dell'olio.

Un discorso analogo a quello fatto per l'olio del trasformatore è possibile ripeterlo per il fluido refrigerante del gruppo di conversione (fig. 24).

7. Conclusioni

In questo articolo è stato illustrato un valido metodo per la realizzazione di modelli termici delle principali apparecchiature della catena di trazione di un treno ad alta velocità. In particolare, per ogni modello sono state progettate reti termiche dinamiche descrittive dei principali fenomeni di tra-

Table 12 shows a high combination of experimental temperatures and temperature values from simulation, in the light of this we can confirm the validity of the thermal model developed for the transformer.

6. Route simulations

Downstream of performed validations we can use the model to realistically simulate the response of thermal stresses in the main engine components in the operation of the train along a generic route.

In particular, this paragraph refers to the "Milan-Naples" route. In addition, a comparison between the operation of the train under normal conditions (two active locomotives) and operation in degraded conditions (one active locomotive) is made (e.g. fig. 22).

In particular, two trends are displayed for each graph, referring to nominal operating conditions (2 active locomotives) (blue) and degraded operating conditions (1 active locomotive) (red). It is evident that in degraded conditions the single locomotive is most overloaded to cope with the lack of traction in the broken locomotive. As a result, in the course of operation in degraded conditions there are more thermal stresses on the components of the traction chain. This fact is confirmed, for example, by the temperature on the motor stator teeth, represented in fig. 22.

Fig. 23, in which the average thermal jump between the transformer oil and ambient air is shown, a greater machine thermal stress in degraded conditions is evident.

On the "Florence-Rome" route, for example, 250 km/h are reached both in normal conditions and in degraded conditions, this however involves (in operation with a single active locomotive) a considerable increase in losses and a consequent rise in the oil temperature.

Similarly to the transformer oil it can be repeated for the refrigerant of the conversion group (fig. 24).

7. Conclusions

This article has illustrated a valid method for the construction of temperature models of the main equipment of the traction chain of a train at high speed. In particular, for each model have been designed dynamics thermal networks of the main phenomena of heat transfer in-

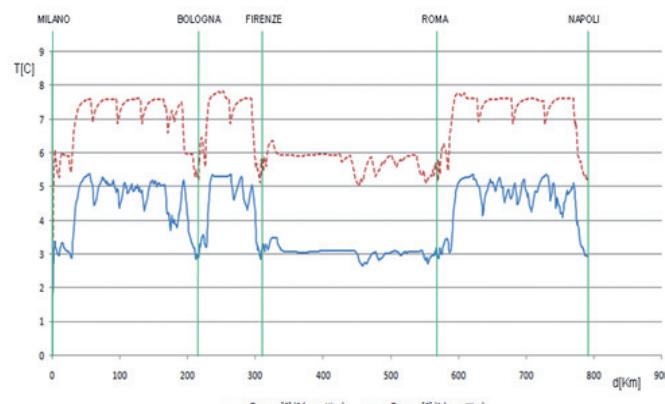


Fig. 24 - Andamenti del salto termico medio tra il fluido refrigerante del gruppo di conversione e l'aria in ingresso all'apposito scambiatore di calore in funzione della distanza percorsa.

Fig. 24 - Trends of the average thermal gradient between the refrigerant, of the conversion unit, and the air, as input to the appropriate cooler, as a function of the running distance.

SCIENZA E TECNICA

smissione del calore coinvolti nel funzionamento delle apparecchiature. Inoltre, sulla base di analisi effettuate sulle caratteristiche tecniche e operative del sistema di propulsione sono stati implementati robusti ed affidabili metodi di calcolo delle perdite nelle varie parti attive di ogni dispositivo elettrico modellato. Un'altro risultato fondamentale del lavoro descritto consiste nell'aver reso i vari modelli direttamente interfacciabili con le variabili in ingresso fornite dal simulatore di tratta (tensione della catenaria, sforzo di trazione, velocità del treno, ecc.). Infine, dopo aver validato i modelli realizzati tramite riferimenti a valori di temperatura provenienti da prove di tipo sulle apparecchiature a dai dati diagnostici rilevati dall'esercizio, sono state condotte delle simulazioni su tratte reali, percorribili dal treno. Alla luce dei risultati ottenuti è possibile ritenere i modelli termici esposti validati per i principali componenti della catena di trazione del treno ad alta velocità Frecciarossa ETR500, in particolare: motore, inverter, convertitore di ingresso e trasformatore.

Il metodo di realizzazione del simulatore termico, descritto in tale articolo, ha tutti i requisiti per essere utilizzato come modello di riferimento nell'implementazione di modelli termici nell'ambito della propulsione elettrica ferroviaria, eventualmente personalizzabili a seconda delle caratteristiche particolari del mezzo di trazione. L'integrazione del modello termico realizzato con modelli di calcolo dei tempi di percorrenza e della vita residua dei componenti in base alle temperature di esercizio, consente infine di poter valutare in modo completo gli impatti e le potenzialità relative all'utilizzo del mezzo di trazione su profili di missione e tipologie di servizi differenti da quelli originari ed in linea con le esigenze variabili del mercato.

volved in the operation of the equipment. In addition, on the basis of the analyzes carried out features and specifications operation of the propulsion system, have been implemented robust and reliable methods for calculating losses in the various active parts of each electrical device modeled. Another key result of the work described consists in having made the various models directly interfaced with the input variables provided by the simulator of trafficking (overhead line voltage, tractive effort, train speed, etc.). Finally, after having validated models made by reference to the values of temperature from type tests on equipment and to the diagnostic data collected from exercise, simulations have been conducted on real routes that may be followed by train. In light of the results obtained it is possible to consider the exposed thermal models validated for the main components of the traction chain of high-speed train Frecciarossa ETR500, including: motor, inverter, input converter and transformer.

The method of embodiment of the thermal simulator, described in this article, it has all the requirements to be used as a reference model implementation for create thermal simulators in the context of electric propulsion in trains, possibly customized according to the particular characteristics of the traction unit. The integration of the thermal model made with models of calculation of travel times and model calculating the remaining life of component according to operating temperatures, allows finally, to be able to fully assess the impacts and use of the traction in different mission profiles and different types of services from the original ones and in line with the demands of the variables market.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] Di PIERRO, "Costruzioni elettromeccaniche" (Vol.1).
- [2] RIZZO, "Funzionamento in configurazione alternata dell'azionamento dell'ETR 500: il convertitore 4Q", Ingegneria Ferroviaria, 2009.

Sommaire

SIMULATEUR THERMIQUE POUR LES CHAÎNES DE TRACTION DES TRAINS À HAUTE VITESSE, APPLICATION SUR LE TRAIN ETR500-FRECCIAROSSA

Cet article est structuré comme il suit : tout au début on retrouve les principes théoriques qui sont à la base de l'emploi des réseaux à circuits (réseaux thermiques) pour représenter le comportement thermique des machines électriques; par la suite il décrit brièvement l'architecture générale du système de propulsion du train Frecciarossa ETR 500 et les systèmes de refroidissement y employés; dans sa partie centrale l'article affronte les vrais descriptions des modèles thermiques, ainsi que leurs validations, suivies par les simulations des parcours réels effectués par le train; l'article se conclu par l'exposition des conclusions.

Zusammenfassung

SIMULATIONSVERFAHREN ZUR BERECHNUNG DER THERMISCHEN VERHALTEN DER ANTRIEBEN VON HOCHGESCHWINDIGKEITSZÜGEN, AM BEISPIEL DES ETR 500 FRECCIAROSSA.

Theoretische Grundlagen der thermischen Netzen die das thermische Verhalten von Elektromaschinen beschreiben. Kurze Vorstellung der Antriebs- und Kühlung-Systemen der Zügen ETR 500. Danach Beschreibung der thermischen Modellen und deren Validierung. Es folgt eine Reihe Simulationen Zugfahrten. Schlussfolgerungen.