



Prospettive di integrazione della rete elettrica ferroviaria italiana in alta tensione con altri gestori

Integration outlooks of high voltage Italian railways electric network with other providers'

Dott. Ing. Marco DIANA^(*), Dott. Ing. Irene MACAGNO^(*)

1. Premessa

Gli attuali meccanismi di approvvigionamento di elettricità delle Ferrovie in Italia trovano la loro origine nella nazionalizzazione del settore elettrico avvenuta nel 1962, e nella conseguente creazione di Enel, quando il sistema di produzione elettrico delle FS fu trasferito alla nuova società in cambio di condizioni di fornitura agevolate. Tuttavia, dopo l'apertura completa del mercato elettrico nel 2007, la normativa italiana apre nuove possibilità per la gestione degli elettrodotti di proprietà di RFI.

Di conseguenza, l'obiettivo del presente lavoro è individuare quali tratti della rete elettrica in alta tensione di RFI rivestano una maggiore importanza strategica all'interno dell'infrastruttura elettrica complessiva in Italia. Molteplici possono essere i motivi d'interesse di tale analisi, che spaziano da una corretta valorizzazione delle singole tratte, che non può basarsi evidentemente sulle mere caratteristiche tecniche della linea, ad una programmazione degli investimenti e dello sviluppo dell'infrastruttura che eviti di creare doppiopioni o sovrapposizioni.

Dopo un'analisi dell'evoluzione del quadro normativo del settore, sono stati individuati i punti strategici dell'infrastruttura di trasporto di energia ad alta tensione di RFI, attraverso una metodologia derivata dalla *network analysis* che ci ha permesso di costruire un modello di rappresentazione dell'insieme delle reti in alta tensione presenti sul territorio nazionale. All'interno della rete nazionale abbiamo contestualizzato la rete di RFI e abbiamo valutato alcuni indici di centralità, ossia i parametri che identificano l'importanza dei singoli nodi all'interno della rete. Pertanto sono stati individuati i nodi di RFI con un maggior numero di connessioni che siano anche rilevanti ai fini della struttura portante della rete stessa. Tali nodi sono situati nella parte centro-orientale della penisola: a seguito di questo risultato, sono stati individuati sei casi in cui la sinergia di tratti della rete RFI con tratti di rete Terna è potenzialmente molto significativa.

1. Foreword

Existing mechanisms for electricity supply of Railways in Italy find their origin in the nationalization of the electricity sector in 1962, and in the consequent creation of Enel, when the system of production of electricity owned by FS was transferred to the new company in exchange for facilitated supply conditions. However, after the full opening of the electricity market in 2007, the Italian legislation opens up new possibilities for the management of power lines owned by RFI.

Consequently, the objective of this work is to identify which segments of the high-voltage network of RFI are of greater strategic importance within the overall electrical infrastructure in Italy. Multiple reasons may be of interest of this analysis, ranging from a correct evaluation of the individual sections, which obviously cannot be based on mere technical characteristics of the line, to a program of investment and infrastructure development that avoids duplications or overlaps.

After an analysis of the evolution of the regulatory framework, strategic points of the transmission of high voltage energy of RFI have been identified using a method derived from the network analysis that allowed us to build a model of representation of a set of high voltage grids throughout the country. In the national network we contextualized the network of RFI and we evaluated some indexes of centrality, i.e. the parameters that identify the importance of individual nodes within the network. Therefore nodes RFI were identified with a greater number of connections that are also relevant to the structure of the network itself. These nodes are located in the east-central part of the peninsula as a result of this, and six cases were identified in which the synergy of parts of the RFI network with sections of the Terna network is potentially very significant.

2. Introduction

Over the past ten years the focus on the issues relating to the supply and consumption of energy has continuously in-

^(*) Politecnico di Torino – DIATI

^(*) Politecnico di Torino – DIATI

2. Introduzione

Negli ultimi dieci anni è continuamente aumentata l'attenzione nei confronti dei problemi inerenti l'approvvigionamento e il consumo di energia. Il Decreto Legislativo 79/99 ha riordinato il settore elettrico italiano nel suo complesso, ponendo fine al monopolio di Enel nel campo della produzione, trasmissione e della vendita di energia. Da quel momento si è aperto alla concorrenza un settore nuovo, che ha favorito la nascita di nuove imprese nel settore, soprattutto nel campo della produzione e distribuzione. Per esempio è "tornata" al settore energetico la storica società elettrica *Edison*, che aveva riorientato i suoi interessi su altri settori (per esempio quello chimico mantenendo gli impianti come autoproduttore) dopo la nazionalizzazione degli impianti di produzione e di distribuzione dell'energia elettrica avvenuta nel 1962.

La ricerca nel seguito descritta si propone di valutare le possibili evoluzioni delle politiche energetiche del gruppo Ferrovie dello Stato, alla luce degli obiettivi nazionali e comunitari in tema di politica energetica e del quadro normativo che si va delineando negli ultimi anni. In particolare, cercheremo di individuare le prospettive gestionali e di utilizzo della rete in alta tensione che il gruppo possiede. Le recenti evoluzioni della regolamentazione nel settore stanno infatti aprendo numerose opportunità per gli attori sul mercato dell'energia, che però per essere colte richiedono analisi di tipo tecnico anche con metodi di indagine diversi da quelli tradizionalmente impiegati "in ambito elettrotecnico". In particolare, si osserva che una maggiore interoperabilità delle reti elettriche facenti capo ai diversi proprietari e gestori, resa possibile sia dalla tecnologia (*reti intelligenti*) che dai più recenti provvedimenti, permetterebbe di aumentare l'efficienza nell'uso degli impianti: nel caso delle Ferrovie, questi potrebbero in prospettiva diventare una risorsa invece di costituire un mero costo per la produzione del servizio di trasporto ferroviario.

Coerentemente con tale impostazione, nel prosieguo descriveremo dapprima brevemente il quadro normativo a livello europeo ed italiano entro cui il settore opera, seguendone l'evoluzione dalla nazionalizzazione del settore alla successiva liberalizzazione, sino agli sviluppi più recenti. Analizzeremo poi sinteticamente come la posizione del gruppo Ferrovie dello Stato all'interno di tale settore economico sia in continua evoluzione, in conseguenza sia dei documenti di indirizzo comunitari che delle normative nazionali. Cercheremo infine di cogliere quali potrebbero essere le strategie future dell'azienda, per identificare quale tipo di analisi sul piano tecnico sono necessarie per porle in essere.

In conseguenza di tale disamina, nel seguito del lavoro proponiamo un modello per contestualizzare la rete del gruppo nel panorama delle reti in alta tensione presenti sul territorio nazionale, facenti capo a diversi soggetti. Inizialmente, rappresenteremo attraverso un grafo

creased. The Legislative Decree 79/99 re-structured the Italian electricity sector as a whole, putting an end to the monopoly of Enel in the production, transmission and sale of electricity. From that moment a new sector was opened up to competition, which favored the creation of new companies in the sector, especially in the areas of production and distribution. For example it "returned" to the energy sector the historic Edison power company, which had refocused its interests on other sectors (such as chemical by maintaining the facilities as a self-producer) after the nationalization in 1962 of the production plants and electricity distribution.

The research described below is aimed at evaluating the possible evolutions of the energy policies of the Ferrovie dello Stato group, in the light of both national and European Community objectives in the field of energy policy and regulatory framework that has been emerging in recent years. In particular, we will try to identify the perspectives of management and use of the high-voltage grid that the group possesses. Recent developments in the field of regulation are in fact opening up many opportunities for the actors on the energy market; such opportunities, in order to be captured, will need a technical analysis of survey methods other than those traditionally used "in the field of electrical engineering." In particular, it is observed that greater interoperability of electricity networks belonging to different owners and managers, made possible by technology (smart grids) and the most recent regulations, would increase efficiency in the use of the plants: in the case of Railways, they may in the future become a resource instead of being a mere cost for the production of rail transport service.

Consistent with this approach, hereinafter we will first briefly describe the regulatory framework at European and Italian levels within which the industry operates, followed by its development by the nationalization of the sector and subsequent liberalization, up to the most recent developments. Then we will briefly analyze how the position of the Ferrovie dello Stato group within this economic sector is constantly evolving, both as a result of the guidelines issued by the Community and the national regulations. Finally, we will take what might be the future strategies of the company, to identify which type of analysis on a technical level are necessary to put them in place.

As a result of this investigation, in the latter part of this article we propose a model to contextualize the group's network in the general overview of high voltage grids throughout the country, belonging to different subjects. Initially, we will represent a graph containing the set of high-voltage networks in Italian. Since the result would be complex, on the basis of information available to geographically locate the nodes of the graph, we then used a survey methodology by which this aspect is neglected; we have used instead recently developed algorithms and tools in the analysis of networks. It is a field of research that, while presenting many points in common with more traditional graph theory, is experiencing a rapid development linked to the growing interest to analyze, for example, new forms of interpersonal relationship made possible by information technology and com-

l'insieme delle reti in alta tensione italiane. Risultando complesso sulla base delle informazioni a disposizione localizzare geograficamente i nodi del grafo, abbiamo in seguito utilizzato una metodologia di indagine che prescindesse da tale aspetto, ricorrendo a strumenti e algoritmi recentemente sviluppati nell'ambito dell'analisi delle reti. Si tratta di un campo di ricerca che, pur presentando molti punti in comune con la più tradizionale teoria dei grafi, sta conoscendo un impetuoso sviluppo legato al crescente interesse ad analizzare ad esempio le nuove forme di relazione interpersonale rese possibili dalle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, con significative implicazioni che spaziano dall'informatica alle scienze sociali o alla biologia [1]. Vale inoltre la pena citare la notorietà recentemente acquisita in Italia da tali strumenti di analisi presso il grande pubblico, attraverso la loro applicazione allo studio delle dinamiche del consenso elettorale in vista delle elezioni politiche nazionali del 2013⁽¹⁾.

L'utilizzo di tale metodologia ci ha permesso di affrontare lo studio delle reti elettriche in modo innovativo, non focalizzandosi sulla localizzazione di una determinata infrastruttura o su questioni inerenti il fenomeno fisico di trasporto dell'energia, quanto piuttosto sul posizionamento strategico dell'infrastruttura di RFI in relazione alla rete complessiva. Operativamente, abbiamo calcolato alcuni indici normalmente utilizzati nell'analisi delle reti sociali e successivamente li abbiamo interpretati al fine di valutare quali siano i punti nevralgici, e quindi di maggior interesse anche commerciale, della rete RFI. Successivamente, abbiamo identificato i tratti di questa rete maggiormente complementari con quelli di altri gestori, nel senso che potrebbero contribuire ad una ottimizzazione della Rete di Trasmissione Nazionale.

L'interesse di tali analisi risiede, ad esempio, in una migliore comprensione del valore di mercato di singoli tratti di elettrodotto di RFI, che non dipende solo dalle sue caratteristiche tecniche (che possono sempre cambiare sulla base di opportuni investimenti) ma anche dal suo posizionamento nell'ambito della rete complessiva, ad esempio in termini di centralità dei nodi, di interconnessione con altri tratti o di complementarità con reti di altri gestori. Inoltre, nell'ambito di una strategia complessiva di sviluppo e di potenziamento dell'infrastruttura di trasporto dell'energia, appare evidente che la pianificazione dei singoli enti dovrebbe tener conto della rete complessiva che fa capo anche ad altri soggetti, onde evitare un'allocatione non ottimale delle risorse. In tal senso, la metodologia proposta può anche essere uno strumento operativo atto a facilitare un'attività di coordinamento fra diversi soggetti che porti ad evitare doppioni o sovrapposizioni negli investimenti.

munication, with significant implications ranging from computer science to social science and biology [1]. It is also worth mentioning the recently acquired notoriety in Italy by these analysis tools to the general public, through their application to the study of the dynamics of electoral support ahead of the national elections of 2013⁽¹⁾.

The use of this methodology allowed us to approach the study of electrical networks in an innovative way, not focusing on the localization of a given infrastructure or on matters relating to the physical phenomenon of energy transport, but rather on the strategic positioning of RFI's infrastructure in relation to the overall network. Operationally, we have calculated some indexes normally used in the analysis of social networks and then have interpreted them in order to determine the neuralgic points, hence of greater interest, commercial as well for RFI's network. Subsequently, we identified the segments of this network that are more complementary with those of other operators, in a manner that could contribute to an optimization of the National Transmission Network.

The interest of such analysis resides, for example, in a better understanding of the market value of individual sections of power line owned by RFI, which depends not only on its technical characteristics (that can always change on the basis of appropriate investment) but also from its positioning within the overall network, for example in terms of the centrality of the nodes, interconnected with other sections or complementarily with the networks of other operators. In addition, as part of an overall strategy for the development and enhancement of energy transport infrastructure, it is clear that the planning of individual institutions should take into account the overall network that belongs to other parties in order to avoid a non-optimal allocation of resources. In this sense, the proposed methodology can also be an operational tool that facilitates coordination activities between different parties which leads to avoid duplication or overlap in investments.

3. Power transmission lines: historic, legislative aspects, and opportunities for RFI's infrastructure

3.1. The orientations of the EC energetic policy, and relative opportunities for RFI

With the signing of the Kyoto Protocol in 1997, Europe has stepped up efforts to mitigate the problems related to the environment and climate changes, proposing initiatives that were not only competitive but also sustainable. This policy also finds resonance in the energy field: for example the communication of the European Commission in November 2010 has acquired particular media importance [2], which

⁽¹⁾ Vedasi la piattaforma Tycho utilizzata dal quotidiano La Stampa (<http://voto2013.lastampa.it/> - sito visitato il 19/07/2013).

⁽¹⁾ See for this the Tycho platform used by the newspaper "La Stampa" (<http://voto2013.lastampa.it/> - last accessed on 19/07/2013).

3. Le reti elettriche di trasmissione: quadro storico e legislativo e opportunità per l'infrastruttura di RFI

3.1. Gli indirizzi di politica energetica comunitaria e le relative opportunità per RFI

Con la firma del protocollo di Kyoto nel 1997, l'Europa ha intensificato l'azione volta a mitigare i problemi legati all'ambiente e al cambiamento climatico, proponendo interventi che fossero non solo competitivi, ma anche sostenibili. Questa politica trova risonanza anche nel campo energetico: ha acquisito ad esempio particolare rilievo mediatico la comunicazione della Commissione Europea del Novembre 2010 [2], che auspica per il 2020 una riduzione delle emissioni di gas serra e dei consumi energetici del 20%, oltre che un aumento al 20% della quota di fabbisogno energetico soddisfatto con fonti rinnovabili.

Si tratta di obiettivi ambiziosi, che implicano profondi cambiamenti ad esempio nei comportamenti dei cittadini e nei processi industriali ma che hanno anche riflessi nell'organizzazione dei mercati o, nello specifico, nei metodi di distribuzione dell'energia. A questo proposito, la comunicazione del 2007 "Una politica energetica per l'Europa" [3], introduce il pacchetto integrato di misure che istituiscono la politica energetica europea (il cosiddetto pacchetto "Energia"). Tra queste, viene contemplata la realizzazione di un mercato interno dell'energia elettrica a livello comunitario per offrire una vera scelta ai consumatori fra diverse opzioni per approvvigionarsi a prezzi equi e competitivi, contribuendo all'incremento di efficienza dell'intero comparto.

Nella successiva comunicazione dell'8 marzo 2011, la Commissione Europea afferma più specificatamente che l'affidabilità e l'integrazione delle reti energetiche europee costituiscono un presupposto essenziale, non solo al raggiungimento degli obiettivi della politica energetica dell'UE, ma anche per la sua strategia economica [4]. La modernizzazione delle reti europee permetterà agli stati di ridurre i problemi di approvvigionamento e ai consumatori di beneficiare delle nuove tecnologie e dell'uso intelligente dell'energia. Avere reti moderne e integrate è un requisito indispensabile per raggiungere l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas a effetto serra dell'80-95% entro il 2050, in quanto la maggior parte dell'energia sarà prodotta da fonti rinnovabili e perciò prodotta in impianti lontani dai centri di consumo. La relativa proposta di regolamento è stata recentemente pubblicata [5]. Grande rilievo viene inoltre dato allo sviluppo di *reti intelligenti*, ossia di reti elettriche di distribuzione affiancate da reti di telecomunicazione [6]. Ad esempio, grazie a contatori elettronici si possono rilevare in tempo reale i consumi e i flussi immessi dagli impianti, bilanciando in tempo reale la rete e riducendo gli sprechi.

Da questo breve excursus appare chiaro che le istitu-

calls for a reduction by 2020 of greenhouse gas emissions and energy consumption by 20%, as well as a 20% increase of the share of energy needs supplied by renewable sources.

These are ambitious goals, which involve profound changes, for example in the behavior of citizens and in industrial processes but also present reflections in the organization of markets or, more specifically, in the methods of distribution. In this regard, the 2007 Communication "An Energy Policy for Europe" [3] introduces the integrated package of measures establishing the European energy policy (the so-called package "Energy"). Among these the creation of an internal market in electricity at Community level is contemplated in order to offer consumers a real choice between different options to obtain supplies at fair and competitive prices, contributing to the increase of efficiency of the entire sector.

In the subsequent communication of 8 March 2011, the European Commission states more specifically that the reliability and the integration of European energy networks are a prerequisite, not only to achieve the objectives of EU energy policy, but also for its economic strategy [4]. The modernization of European networks will allow countries to reduce supply problems and allow consumers to benefit from new technologies and intelligent energy. The fact of having modern and integrated networks is a prerequisite to achieve the goal of reducing greenhouse emission gases by 80 to 95% by 2050, as most of the energy will be produced from renewable sources and therefore produced in systems far from the centers of consumption. Its proposal for a regulation was recently published [5]. Great emphasis is also given to the development of intelligent networks, i.e. electricity distribution grids flanked by telecommunications networks [6]. For example, thanks to electronic meters one can detect in real time the consumption and flows generated by the plants, balancing the network in real time and reducing any wasted energy.

From this brief overview it is clear that the European institutions are promoting the creation of a European market for energy, and they consider the technical and legislative integration of cross-border transmission networks as an essential condition for this to happen. In fact, the European Commission regulated by Resolution 714/2009, the procedure by which an individual who invests in cross-border lines (merchant lines) may require use of the right of exemption from third party access for a number of years that are related to the return of investment.

We note here that within these plans for harmonization of the electricity networks aimed to facilitate cross-border trade, could also include the network of RFI, as indeed shows a historical precedent. The Authority for Electricity and Gas no. 151/02 [7] provided a similar system for the development of interconnecting networks with foreign countries in exchange for the right to priority access. In this context, in 2004 RFI had identified three owned dash lines, bordering Slovenia and Austria, where cross-border trade was deemed possible [8].

zioni europee stiano promuovendo la creazione di un mercato europeo per l'energia e che ritengano l'integrazione tecnica e legislativa delle reti di trasmissione transfrontaliere come una condizione essenziale perché questo avvenga. In effetti la Commissione Europea ha regolamentato con la Delibera 714/2009 la procedura per cui un privato che investe su linee transfrontaliere (*merchant lines*) può richiedere lo sfruttamento del diritto di esenzione della connessione di terzi per un numero di anni legato al ritorno dell'investimento.

Rileviamo in questa sede che nei piani di armonizzazione delle reti elettriche per favorire gli scambi transfrontalieri potrebbe rientrare anche la rete di RFI, come peraltro dimostra un precedente storico. La delibera dell'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas n. 151/02 [7] prevedeva analogo sistema per lo sviluppo di reti di interconnessione con l'estero in cambio del diritto di accesso prioritario. In questo contesto, nel 2004 RFI aveva individuato tre propri tratti di linea, confinanti con Slovenia e Austria, dove erano possibili degli scambi transfrontalieri [8].

Sebbene il progetto delle *merchant lines* per RFI non sia concretizzato, esso rimane un chiaro esempio di come la rete elettrica di proprietà delle Ferrovie possa essere utilizzata in ambito europeo oltre che nazionale, data la presenza di tale rete in aree di confine. Le opportunità di sviluppo di sinergie non mancano comunque neppure in ambito nazionale, come evidenzieremo meglio nel resto dell'articolo.

3.2. Organizzazione e attori del mercato elettrico

Il mercato elettrico ha una struttura atta a tenere conto della natura del bene scambiato (l'energia elettrica, bene per il quale lo stoccaggio non è praticamente possibile) e quindi, della necessità di pianificare adeguatamente i volumi scambiati per rispondere alle esigenze degli utenti e garantire il bilanciamento della rete. Pertanto, i limiti di transito sono un forte vincolo per lo scambio di energia sul mercato elettrico. Infatti, la capacità di transito disponibile influenza notevolmente il mercato sia per quanto riguarda la determinazione dei prezzi sia per quanto riguarda le quantità scambiate.

Tali vincoli di natura tecnica, unitamente agli obiettivi di tipo politico e alla regolamentazione illustrati nel paragrafo precedente, danno luogo ad un'organizzazione del mercato elettrico piuttosto complessa. In particolare, presentiamo brevemente i principali attori del sistema elettrico secondo quanto previsto dalla normativa vigente, in modo tale che siano chiari i diversi ruoli dei soggetti coinvolti quando presenteremo l'analisi tecnica:

- *Ministero dello Sviluppo Economico*, che definisce gli indirizzi strategici ed operativi per la sicurezza e l'economicità del sistema.
- *Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas*, che garantisce la promozione della concorrenza e dell'efficienza nel settore ed ha funzioni di regolazione e controllo.

Although the project of merchant lines for RFI did not materialized, it remains a clear example of how the power network property of Railways can be used both in the European as well as in a national context, given the presence of such a network along the border areas. Opportunities for developing synergies are also available at national level, as we will further discuss in the remainder of this article.

3.2. Organization and key figures in the electric market

The electricity market has a structure designed to take into account the nature of the goods traded (electricity, a good for which storage is not practically possible) and thus the need to properly plan the volumes to be traded in order to meet the needs of users and ensure the balance of the network. Therefore, the transit limits are a major constraint for the exchange of energy in the electricity market. Indeed, the transit capacity provided will greatly influence the market as regards both the pricing and the quantity traded.

These technical constraints, together with the objectives of public policy and regulation described in the previous paragraph, give rise to a rather complex organization of the electricity market. In particular, we discuss briefly the main actors of the electrical system as required by law, so that one is able to understand the different roles of the parties involved when technical analysis is presented:

- *Ministry of Economic Development, which defines the strategic and operational guidelines for the safety and cost-effectiveness of the system.*
- *Authority for Electricity and Gas, which ensures the promotion of competition and efficiency in the industry, and has functions of regulation and control.*
- *Manager of the National Transmission Network, responsible for ensuring the dispatching⁽²⁾ of energy on the network itself; the manager is responsible for balancing the flow of electricity at all times so that the energy demand and supply are always in balance. For Italy the handler is the Italian company Terna Rete SpA.*
- *Manager of Energy Services SpA, which collects the production of energy and manages the sale on the market.*
- *Acquirente Unico, SpA, a joint stock company of the Manager of Energy Services GSE SpA, which is entrusted by law the role of guarantor of the supply of electric power in the service of greater protection and safeguard.*
- *Manager of Energy Markets, SpA, a joint stock company of the group Manager of Energy Services GSE SpA, which organizes and manages the electricity market, according to principles of neutrality, transparency, objectivity and competition among producers.*

⁽²⁾ Dispatching is the activity aimed at giving directions for the coordinate utilization and operation of production plants, transmission networks and auxiliary services.

- *Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale*, incaricato di garantire il dispacciamento⁽²⁾ dell'energia sulla rete stessa, cioè si occupa di bilanciare i flussi di energia elettrica in ogni istante in modo che la domanda di energia e l'offerta siano sempre in equilibrio. Tale gestore è per l'Italia la società *Terna Rete Italia S.p.A.*
- *Gestore dei Servizi Energetici S.p.A.*, che ritira la produzione di energia e ne gestisce la vendita sul mercato.
- *Acquirente Unico S.p.A.*, società per azioni del gruppo Gestore dei Servizi Energetici GSE S.p.A., cui è affidato per legge il ruolo di garante della fornitura di energia elettrica nell'ambito del servizio di maggiore tutela e di salvaguardia.
- *Gestore dei Mercati Energetici S.p.A.*, società per azioni del gruppo Gestore dei Servizi Energetici GSE S.p.A., che organizza e gestisce il mercato elettrico, secondo criteri di neutralità, trasparenza, obiettività, nonché di concorrenza tra produttori.
- *Produttori*, gestori degli impianti che producono energia elettrica dalle diverse fonti come, ad esempio, Enel-Produzione e Edison.
- *Clienti finali*, persone fisiche o giuridiche (clienti domestici e aziende) che acquistano energia per uso proprio.
- *Operatore elettrico*, persona fisica o giuridica che è ammessa ad operare sul mercato elettrico.

Oltre a questa pluralità di soggetti esplicitamente richiamati dalla normativa e che interagiscono all'interno del mercato elettrico, occorre infine ricordare il ruolo dei *distributori*, soggetti che distribuiscono l'energia sul territorio e che pertanto costituiscono il collegamento tra il sistema "mercato elettrico" e i clienti finali (ad esempio Enel-Distribuzione, Edison o Acea).

Tenere in considerazione i differenti ruoli di tali organismi e società permette di meglio comprendere le motivazioni alla base delle analisi tecniche in seguito proposte. Concentrando maggiormente la nostra attenzione su RFI, notiamo in particolare che tale società svolge sia la funzione di gestore della propria rete di distribuzione in alta tensione, sia il ruolo di fornitore e di cliente finale, acquistando sul mercato elettrico l'energia necessaria ad alimentare la linea di contatto. Queste attività sono il risultato delle successive evoluzioni storiche del ruolo ricoperto dalle Ferrovie nel mercato elettrico italiano nel corso del XX secolo, che è opportuno richiamare ora brevemente per mettere meglio a fuoco quali potrebbero essere gli scenari futuri nella gestione della rete elettrica in alta tensione posseduta dalla società.

⁽²⁾ Dispacciamento è l'attività diretta ad impartire disposizioni per l'utilizzazione e l'esercizio coordinato degli impianti di produzione, della rete di trasmissione e dei servizi ausiliari.

- *Manufacturers, operators of installations that produce electricity from different sources such as, for example, Enel and Edison-Production.*
- *End customers, natural or legal persons (companies and domestic customers) who purchase energy for their own use.*
- *Electric operator, natural or legal person who is admitted to trade on the electricity market.*

In addition to this variety of subjects explicitly mentioned in the rules and who interact within the electricity market, it is finally necessary to recall the role of distributors, who distribute the energy in the area and, therefore, constitute the link between the "market power" and end customers (e.g. Enel-Distribuzione, Edison or ACEA).

Taking into account the different roles of these agencies and companies can provide a better understanding of the motivations behind the technical analysis later proposed. Focusing more our attention on RFI, we note in particular that the company carries out the function of manager of its own high-voltage distribution network, the role of provider and role of end-consumer by purchasing on the electricity market the energy needed to power the contact line. These activities are the result of subsequent historical developments of the role played by the Railways in the Italian electricity market during the twentieth century, that is appropriate to recall now briefly to better focus what could be the future scenarios in the management of the high-voltage network owned by the company.

3.3. The Italian High Voltage Electric Network for Railways

Historically, the development of a high-voltage electrical system of the State Railways took place in parallel to the activities related to the electrification of railway lines in the early twentieth century. Railways built a primary network for the distribution and transmission of electricity in order to feed their own lines. In the '50s and '60s, the railways were a major player in both the production and transmission of energy, aiming not only to self-sufficiency through the direct production (Larderello and Sagittario power plants) or shareholdings in companies, but especially aiming to the establishment of its own independent electrical system thus receiving a return from both the sale of energy and its carriage [9], [10].

The activity of Ferrovie in this field obviously changed dramatically after the nationalization of the industry in 1962, when production facilities and a part of the distribution network were transferred to the newly established Enel in exchange for discounted rates for the supply of electricity. As a result, investments in the development of the plants remained under Ferrovie were reduced.

Over the years, the relationship between FS and Enel has evolved based upon the change in the purpose of the two agencies, meanwhile transformed into companies under pri-

3.3. La rete elettrica ferroviaria in alta tensione italiana

Storicamente, lo sviluppo di un sistema elettrico in alta tensione delle Ferrovie dello Stato avvenne in parallelo agli interventi di elettrificazione delle linee ferroviarie, agli inizi del XX secolo. Le Ferrovie costruirono una rete primaria per la distribuzione e il trasporto dell'energia elettrica allo scopo di alimentare le proprie linee. Negli anni '50 e '60, le Ferrovie erano un attore importante nel campo sia della produzione che del trasporto dell'energia, mirando non solo all'autosufficienza attraverso la produzione diretta (centrali di Larderello e Sagittario) o partecipazioni in aziende produttrici, ma soprattutto alla costituzione di un proprio sistema elettrico autonomo, ricavando un utile sia dalla vendita di energia che dal suo vectoramento [9], [10].

L'attività delle Ferrovie in questo campo mutò ovviamente in modo radicale dopo la nazionalizzazione del settore nel 1962, quando gli impianti di produzione e una parte della rete di distribuzione vennero conferiti alla costituenda Enel in cambio di tariffe agevolate per la fornitura di elettricità. Di conseguenza, gli investimenti per lo sviluppo degli impianti rimasti di proprietà delle Ferrovie vennero ridotti.

Nel corso degli anni, i rapporti tra FS e Enel si sono evoluti sulla base della modifica delle finalità dei due enti, nel frattempo trasformati in aziende di diritto privato. Pertanto, se all'epoca delle nazionalizzazioni la disciplina riguardava semplicemente la fornitura di un servizio, relegando in secondo piano l'aspetto economico, a partire dagli anni '90 l'emergere di esigenze di economicità ed efficienza nell'attività delle due aziende, unitamente ad un quadro normativo non più adeguato alla nuova situazione, hanno favorito l'insorgere di contenziosi anche di natura legale.

Ulteriori elementi di novità sono intervenuti con l'avvio del processo di liberalizzazione del settore a partire dal 1999, che si configura per molti aspetti come un ritorno alla situazione antecedente al 1962. L'introduzione del mercato elettrico modifica profondamente il meccanismo di approvvigionamento energetico delle FS, dal momento che non essendo più possibile relazionarsi solo con un unico operatore monopolista seguendo lo schema delle convenzioni, è stato necessario confrontarsi con l'Autorità dell'Energia Elettrica ed il Gas. Dopo un periodo di transizione, nel maggio del 2008, RFI è entrato nel mercato libero e compra la quasi totalità dell'energia sul mercato elettrico, tramite la mediazione del Gestore dei Servizi Energetici, continuando ad usufruire delle compensazioni tariffarie previste dalle norme vigenti.

Per dare un'idea dell'entità delle transazioni in atto, notiamo che i consumi totali di energia primaria (ossia considerando anche i consumi necessari alla produzione e al trasporto dell'energia) del gruppo Ferrovie dello Stato sono stati pari a circa 43 milioni di GJ nel 2010, dei quali quasi 34 destinati alla trazione ferroviaria (elettrica e diesel). In termini di energia diretta, degli oltre 26 milioni di

vate law. Therefore, if at that time when nationalization occurred, the regulation concerned simply the provision of a service, relegating to the background the economic aspect, since the 90s the emergence of economy needs and efficiency in the activities of the two companies, together with a regulatory framework no longer adequate to the new situation, have favored the emergence of disputes including legal suits.

Additional new elements have occurred with the start of the process of liberalization of the sector since 1999, which in many ways is considered as a return to the situation prior to 1962. The introduction of the electricity market significantly modifies the mechanism of energy supply of FS; since it is no longer possible to relate with just a single monopoly operator following the pattern of the conventions, it was necessary to deal with the Authority for Electricity and Gas. After a transition period, in May 2008, RFI has entered the free market and buys almost all the energy in the electricity market, through the mediation of the GSE, and continuing to benefit from the tariff compensation provided by the current law.

To give an idea of the magnitude of transactions in place, we note that the total consumption of primary energy (i.e. considering the consumption necessary for the production and transport of energy) of the Ferrovie dello Stato group totaled about 43 million GJ in 2010, of which nearly 34 were devoted to railway traction (electric and diesel). In terms of direct energy, of the more than 26 million GJ globally consumed by the group in 2010, about 18 are represented by electricity consumption. The amounts consumed are generally smaller compared to the two previous years [11], partly due to the decrease in traffic on the network, as well as actions that have been undertaken aimed at improving energy efficiency.

In the light of regulatory developments outlined above and the amount of energy, it is clear that there is an opportunity for RFI to reconsider its strategies in order to make the most of the infrastructure of his property. Possible theoretical developments could be to focus on its core business, thus selling their plants and outsourcing its activities, or otherwise to return to the strategy of the first half of the twentieth century, once again becoming an active part in the transport sector if not in the production of electricity and therefore aiming at a greater diversification of its activities, perhaps using as an example the strategies put in place by other companies with public participation, the so-called multi-utilities. In both cases, it should however be noted that recent legislation policies set the progressive unification of the national transmission network [12], of which RFI has some features in order to promote greater efficiency and safety in the operation of the network, avoiding problems related to coordination between the Manager and the other owners for aspects such as maintenance and expansion of the network. Free competition is promoted instead in the production and distribution of electric power.

In summary, the overall picture is not exempt from uncertainties and has sometimes given rise to regulatory mechanisms and complex management, whether provisional or

GJ globalmente consumati dal gruppo nel 2010 circa 18 sono rappresentati da consumi di energia elettrica. I consumi si sono globalmente ridotti rispetto ai due anni precedenti [11], in parte per la diminuzione del traffico sulla rete, oltre che per le azioni volte al miglioramento dell'efficienza energetica che sono state intraprese.

Alla luce degli sviluppi normativi fin qui delineati e dell'entità dell'approvvigionamento energetico, appare evidente l'opportunità per RFI di riconsiderare le sue strategie nel settore, al fine di valorizzare al meglio le infrastrutture di sua proprietà. Gli sviluppi teoricamente possibili potrebbero consistere nel concentrarsi sul proprio *core business*, cedendo pertanto gli impianti di sua proprietà ed esternalizzando la relativa attività, o al contrario ritornare alla strategia della prima metà del XX secolo, diventando nuovamente parte attiva nel settore del trasporto se non della produzione dell'energia elettrica e pertanto puntando ad una maggiore diversificazione delle proprie attività, magari sull'esempio delle strategie poste in essere da altre aziende a partecipazione pubblica cosiddette *multiutility*. In entrambi i casi, occorre però tener presente che i recenti indirizzi legislativi dispongono la progressiva unificazione della rete di trasmissione nazionale [12], di cui RFI possiede alcuni tratti, al fine di promuovere una maggiore efficienza e sicurezza nel funzionamento della rete, evitando problemi di coordinazione tra il Gestore e gli altri proprietari per aspetti come la manutenzione e all'ampliamento della rete. La libera concorrenza viene invece promossa nell'ambito della produzione e commercializzazione dell'energia elettrica.

In sintesi, il quadro complessivo non risulta privo di incertezze e ha talora dato luogo a meccanismi di regolamentazione e di gestione complessi, provvisori o a tratti anche esclusivamente settoriali, ad esempio inerenti la natura giuridica della rete di proprietà di RFI (rete chiusa o rete interna d'utente) o gli schemi di formazione del prezzo dell'energia fornita agli operatori dei servizi di trasporto ferroviario (il cosiddetto "treno-km elettrico") [13]. Emerge in ogni caso chiaramente la necessità di procedere sul piano tecnico ad uno studio integrato delle infrastrutture di trasporto dell'energia elettrica facenti capo a diversi soggetti, che consenta di delineare le migliori strategie di indirizzo e di sviluppo dell'attività nel settore. Nella parte sperimentale della presente ricerca ci occuperemo pertanto di un aspetto tecnico centrale che viene evidenziato da questo excursus storico-giuridico, ossia lo studio del grado di sovrapposizione fra reti diverse che in passato sono talvolta state oggetto di interventi non coordinati.

4. Modellizzazione della rete elettrica italiana in alta tensione

4.1. Costruzione del grafo: attributi e ipotesi semplificative

La letteratura scientifica presenta una lunga serie di studi inerenti la topologia delle reti elettriche in alta ten-

even exclusively sectorial, for example those concerning the legal nature of the network owned by RFI (closed network or internal network user), or the patterns of price formation of energy supplied to the operators of rail transport services (the so-called "train-km electric") [13]. It is clear in any case the need to proceed under a technical aspect to an integrated study of the transport infrastructure of electricity belonging to different subjects, making it possible to outline the best address and development strategies in the sector. In the experimental part of this research we will focus our attention to a central technical aspect that is highlighted by this historical-legal overview, in other words the study of the degree of overlap between different networks, which in the past has sometimes been the subject to non-coordinated interventions.

4. The modelling of the high voltage Italian electric network

4.1. Graph construction: attributes and simplifying assumptions

The scientific literature has a long series of studies on the topology of the high-voltage electric networks: ranging from surveys on theoretical properties regarding for instance interconnections between the nodes to studies applied to blackouts and "intelligent networks" [14-19]. Unlike those works, in the following sections we propose to study the topology of the high voltage national electric transmission grid (which also includes the power lines owned by RFI with voltage exceeding 100 kV) to first assess which are the nodes strategically most important (whether they are plants, substations or primary substations). Subsequently we will identify the parts of the network of RFI that can be used in synergy with high voltage electrical public networks.

The first step of the analysis is to construct a representation of the infrastructure through an appropriate graph. The Atlas of the GRTN (Gestore Rete Trasmissione Nazionale) Network provided for each conductor, the following information:

- *ends of power line stretches, which usually correspond to transformer stations or power plants;*
- *The length of the power line in kilometers;*
- *data on the construction properties of the conductor: number of conductors per phase, material, section in mm²;*
- *the type of conductor (overhead or underground cable);*
- *the owner of the infrastructure;*
- *membership of the power line to the National Transmission Network.*

This information has been appropriately revised in order to obtain the input data for the software. Therefore the following attributes of the individual arcs have been defined:

sione: si spazia dalle indagini sulle proprietà teoriche ad esempio inerenti le interconnessioni fra i nodi, agli studi applicativi sui black-out e le “reti intelligenti” [14-19]. A differenza di tali lavori, nel seguito ci proponiamo di studiare la topologia della rete elettrica di trasmissione nazionale ad alta tensione (in cui sono compresi anche gli elettrodotti di proprietà di RFI con tensione superiore a 100 kV) per valutare innanzitutto quali siano i nodi (siano essi impianti di produzione, sottostazioni o cabine primarie) più importanti strategicamente. In seguito, identificheremo i tratti della rete di RFI che possono essere usati in sinergia con reti elettriche in alta tensione pubbliche.

Il primo passo dell'analisi consiste nel costruire una rappresentazione dell'infrastruttura attraverso un appropriato grafo. L'Atlante della Rete del GRTN (Gestore Rete Trasmissione Nazionale) ha fornito, per ogni conduttore, le seguenti informazioni:

- gli estremi dei tratti di elettrodotto, che solitamente corrispondono a stazioni di trasformazione o a centrali elettriche;
- la lunghezza dell'elettrodotto espressa in chilometri;
- i dati sulle caratteristiche costruttive del conduttore: numero di conduttori per fase, materiale, sezione in mm^2 ;
- il tipo di conduttore (aereo o cavo sotterraneo); il proprietario dell'infrastruttura;
- l'appartenenza o meno dell'elettrodotto alla Rete di Trasmissione Nazionale.

Queste informazioni sono state opportunamente rielaborate al fine di ottenere i dati in ingresso per il software. Pertanto, sono stati definiti i seguenti attributi dei singoli archi:

- *origine e destinazione*, che indicano i nodi, o vertici, alle estremità dell'arco;
- *tipo di arco*, che può essere diretto o indiretto secondo la tipologia di corrente; un arco diretto è orientato e può essere percorso in una sola direzione e si presta a rappresentare un collegamento in corrente continua, mentre un arco indiretto non è orientato e può essere percorso in entrambe le direzioni e consente di rappresentare un collegamento in corrente alternata (sia mediante conduttore aereo sia mediante cavo interrato);
- *Label*, un'etichetta che indica il nome dell'ente proprietario dell'elettrodotto;
- *peso*, calcolato attraverso la seguente formula:

$$\text{peso} = 10 \cdot \ln \frac{\rho \cdot L}{V^2 \cdot S \cdot n}$$

dove ρ è la resistività del materiale conduttore a una temperatura di 20°C espressa in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, L è la lunghezza del tratto espressa in km , V è la tensione espressa in kV , S è la sezione del conduttore espressa

- origin and destination, indicating the nodes or vertices at the ends of the arc;
- type of arc, which may be direct or indirect depending on the type of current; a direct arc is oriented and can be traversed in one direction and is suitable to represent a DC link, while an indirect arc is not oriented and can be traversed in both directions and allows to represent an alternating current connection (either by overhead conductor or by underground cable);
- Label, a label indicating the name of the owner of the power line;
- weight, calculated through the following formula:

$$\text{peso} = 10 \cdot \ln \frac{\rho \cdot L}{V^2 \cdot S \cdot n}$$

where ρ is the resistivity of the conductive material at a temperature of 20° C expressed in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, L is the length of the stretch, expressed in km , V is the voltage expressed in kV , S is the section of the conductor expressed in mm^2 and n is the number of conductors per phase. We note that the argument of the logarithm is the inverse of the theoretical power of the conductor, which is considered as in the context of the path analysis minor transmission theoretical powers are associated with higher weights. The application of the logarithm allows to reduce the range of values assumed by weights passing to a representation in order of magnitude, while the multiplication by the factor of 10 allows to operate, in this case, on weights greater than the unit;

- Flag, a binary variable indicating whether or not the membership of the long-distance line to the national transmission network.

These data go back to 2002, but we believe that the basic structure of the network has not changed substantially within the last decade, so any updates would not change significantly the analysis that will be presented. The application package that we used to conduct the study of the network is the open source software Gephi (<http://gephi.org>). The graph that describes the high voltage (i.e. a voltage exceeding 100 kV) transmission network in Italy was found to have 4036 nodes and 5103 arcs. Of these, 262 arcs and 379 nodes belong to the Ferrovie network. Also in consideration of the features of this software, in the modeling of the network we will introduce the following simplifying assumptions:

- we consider a simple graph, in which each pair of vertices is connected by a single arc. This is not in contradiction with the stated objective of finding overlapping long-distance lines, as the latter are represented by paths, or sequences of arcs and nodes, that connect two points in the network at a similar “cost”;
- arcs in the graph will not contain Self-Edge type arcs, i.e. arcs connecting a node to itself;
- the graph will not be oriented, as only 24 relatively marginal sections out of 5103 appear to be run by direct cur-

in mm^2 ed n è il numero di conduttori per fase. Notiamo che l'argomento del logaritmo rappresenta l'inverso della potenza teorica del conduttore, che viene considerata in quanto nell'ambito dell'analisi dei percorsi a pesi elevati vanno associate le minori potenze teoriche di trasmissione. L'applicazione del logaritmo consente di ridurre l'intervallo di valori assunti dai pesi passando a rappresentazione in ordine di grandezza, mentre la moltiplicazione per il fattore 10 consente di operare, nel caso in oggetto, su pesi maggiori dell'unità;

- *Flag*, variabile binaria che indica l'appartenenza o meno alla rete di trasmissione nazionale.

Tali dati risalgono al 2002, ma riteniamo che la struttura di base della rete non abbia subito sostanziali modifiche nell'ultimo decennio, per cui eventuali aggiornamenti non cambierebbero molto le analisi che presenteremo. Il pacchetto applicativo che abbiamo utilizzato per condurre lo studio della rete è il software open source Gephi (<http://gephi.org>). Il grafo che descrive la rete di trasmissione di energia elettrica ad alta tensione in Italia (cioè con tensione superiore a 100 kV) è risultato avere 5103 archi e 4036 nodi. Di questi, 262 archi e 379 nodi appartengono alla rete delle Ferrovie. Anche in considerazione delle funzionalità di tale software, nella modellizzazione della rete introdurremo le seguenti ipotesi semplificative:

- considereremo un *grafo semplice*, in cui ogni coppia di vertici è collegata da un solo arco. Questo non è in contraddizione con l'obiettivo dichiarato di trovare elettrodotti in sovrapposizione, in quanto questi ultimi vengono rappresentati da percorsi, ossia successioni di archi e di nodi, che congiungono due punti della rete ad un "costo" simile;
- nel grafo non avremo archi di tipo *Self-Edge*, cioè archi che connettono un nodo con se stesso;
- il grafo sarà non orientato, in quanto solamente 24 tratti relativamente marginali su 5103 risultano essere percorsi da corrente continua e pertanto la relativa approssimazione è del tutto accettabile.

Dalla definizione di peso adottata osserviamo inoltre che nella nostra modellizzazione non considereremo le correnti che attraversano gli impianti nella realtà, in quanto ci concentreremo sulla capacità dei conduttori con un'analisi di tipo statico. Del resto, in un'analisi di valenza maggiormente strategica quale è quella in seguito proposta, risulta più importante analizzare le potenzialità degli impianti in vista di un loro uso nel futuro di tipo anche diverso da quello attuale, piuttosto che il modo in cui essi vengono attualmente impiegati.

4.2. Rappresentazione della rete e individuazione dei principali proprietari

Avendo modellizzato un grafo senza informazioni sulla localizzazione dei nodi, risulta possibile rappresentarla

rent and therefore the relative approximation is quite acceptable.

From the adopted definition of weight we can also observe that in our modeling we will not consider the real currents that run through plants, since we will focus on the capacity of the conductors with a static type of analysis. Moreover, in a more strategic analysis of valence which is hereinafter given, it is more important to analyze the potential of the plants with a view to their use in the future including those of different types from the current ones, rather than the way in which they are currently employed.

4.2. Representation of the network and determination of the primary owners

Having modeled a graph without information on the location of nodes, it is possible to graphically represent it in an infinite number of different ways. It is then convenient to choose a network layout that highlights the best aspects of interest in the analysis among those available through the used software. We observe that the layout affects the arrangement of the nodes in the figures, but not the calculation of the indexes of each node, where such calculation will be presented later, and that depends only on the algorithm used.

The Gephi software allows one to choose the layout that aims to visually emphasize the differences between the elements, or their complementary or even more, their geographical aspects. Since our goal is to understand what can be the role of the high-voltage network of RFI within the national system, in the following discussion we will focus on the complementary aspects, highlighting within the network the presence of groups of nodes. We therefore use the method of representation called ForceAtlas2, which is also suitable for large networks due to its computational efficiency and that has allowed us to develop the network representation shown in Fig. 1. We recall again that, according to our previous discussion, the position of the nodes in the figure is not connected to the geographical location of the nodes themselves: for example, starting from the top, the first group of vertices indicated with a circle represents the corresponding nodes facilities of South Lazio and Abruzzo, regions, while the second circle includes nodes belonging to the regions of Calabria, Campania, Basilicata and Puglia.

In order to better understand the relevance of the RFI network, shown in fig. 2 are the companies which possess the largest number of nodes, i.e. stations and substations, and shown in fig. 3 are the companies with the greatest extension of the network. As mentioned earlier, the data currently available goes back to 2002, and although the structure of the network has not changed significantly, there have been some changes over the last decade in the corporate structure. In particular, Terna has extended its property acquiring portions of the National Transmission Network of other owners with the exception of the portion of RFI and extending the network also to High Voltage lines of other owners (Enel Distribuzione, ACEA etc.). Despite these developments, hereinafter to be consistent with the data used, we will refer to the ownership struc-

graficamente in un numero infinito di modi diversi. È allora opportuno scegliere un *layout della rete* che evidenzii al meglio gli aspetti di interesse nell'analisi, fra quelli disponibili attraverso il software utilizzato. Osserviamo che il layout condiziona la disposizione dei nodi nelle figure, ma non il calcolo degli indici di ciascun nodo, calcolo che verrà presentato successivamente e che dipende solo dall'algoritmo utilizzato.

Il software Gephi consente di scegliere layout che tendono ad enfatizzare visivamente le differenze tra gli elementi, oppure la loro complementarità o ancora gli aspetti geografici. Essendo il nostro obiettivo capire quale può essere il ruolo svolto dalla rete in alta tensione di RFI all'interno del sistema nazionale, nel seguito ci concentreremo sulla complementarità, evidenziando all'interno della rete la presenza di gruppi di nodi. Pertanto utilizzeremo il metodo di rappresentazione detto *ForceAtlas2*, che risulta inoltre essere adatto alle reti di grandi dimensioni data la sua efficienza computazionale e che ci ha permesso di pervenire alla rappresentazione della rete riportata nella fig. 1. Ricordiamo ancora una volta che, in base a quanto precedentemente descritto, la posizione dei nodi nella figura non è collegata alla localizzazione geografica dei nodi stessi: ad esempio, il primo gruppo di vertici indicato con un cerchio a partire dall'alto rappresenta i nodi corrispondenti agli impianti del basso Lazio e Abruzzo, mentre il secondo cerchio include i nodi appartenenti alle regioni Campania, Calabria, Basilicata e Puglia.

Al fine di meglio comprendere la rilevanza della rete RFI, riportiamo nella fig. 2 le società che possiedono il maggior numero di nodi, ossia stazioni e cabine di trasformazione, e nella fig. 3 le società con la maggiore estensione della rete. Come ricordato in precedenza, i dati di cui disponiamo risalgono al 2002 e, sebbene la struttura della rete non abbia subito sostanziali variazioni, si sono verificati nel corso dell'ultimo decennio alcuni cambi negli assetti societari. In particolare, Terna ha esteso la sua proprietà acquisendo le porzioni della Rete di Trasmissione Nazionale di altri proprietari con l'eccezione della porzione di RFI ed estendendo la Rete anche a linee AT di altri proprietari (Enel Distributori, ACEA ecc.). Nonostante tali evoluzioni, nel seguito per coerenza con i dati utilizzati faremo riferimento agli assetti proprietari della rete al 2002, e pertanto distingueremo la rete di Terna da quella di Enel Distribuzione.

Osservando le figg. 2 e 3, troviamo in entrambi i casi al terzo posto il gruppo Ferrovie dello Stato, risultato che ci permette d'intuire l'importanza di tale rete nel quadro dell'infrastruttura elettrica nazionale per gli aspetti inerenti sia la trasmissione che la distribuzione di energia. Notiamo a questo proposito che Terna, concentrandosi sulla trasmissione, possedeva pochi nodi ma una rete di grande estensione, mentre Enel Distribuzione era nella situazione opposta. Facendo invece riferimento all'attuale assetto proprietario precedentemente illustrato, la rete di RFI risulta essere la seconda rete in alta tensione per

ture of the network in 2002, and therefore distinguish the network of Terna from that of Enel Distribuzione.

Observing Figs. 2 and 3, we observe in both cases the Ferrovie dello Stato group in the third place, a result that allows us to understand the importance of this network in the context of the national electrical infrastructure for both the transmission and distribution of energy. We note in this regard that Terna, focusing on the transmission, had few nodes but a network of great extension, while Enel Distribuzione was in the opposite situation. Referring instead to the current ownership structure described above, the network of RFI appears to be the second high-voltage grid in terms of extension in our country after that of Terna.

5. Determination of the strategic portions of the infrastructure and synergy arcs

5.1. Analysis of nodes through the centrality indexes

With the availability of the graph described in the previous section, we can now study the importance of different nodes and power line sections.

The first analysis aimed at studying the importance of individual nodes, is based on the indexes of centrality. To analyze the network through the indexes of centrality means evaluating which nodes are more strategic and more relevant. We used a total of four indexes, two based on the number of connections of the nodes ("Degree" and "Eigenvector Centrality") and two based on the calculation of minimum paths ("Closeness Centrality" and "betweenness centrality"). The use of different methods will allow us to compare their results to verify the extent to which they agree. Studying these cases it is possible to represent the network in a manner similar to that illustrated in fig.1, but also representing the nodes of size proportional to their importance: such representations are shown in [13].

5.1.1. Degree

The degree is defined as the number of edges connecting a node and is therefore related to the probability that a flow or information that passes on the network pass through the node under consideration. It is a simpler index and more intuitive, since it does not take into account either the amount of indirect connections or of the quality of the connections.

Figs. 4 & 5 show the distribution of the Degree values to the overall network and for that of Railways respectively. 65% of the total nodes in the network are "leaf" nodes (degree 1), such as the private user cabins, or have an incoming and an outgoing arc (degree 2). Only 0.2% of the nodes has a degree between 15 and 17: the majority belongs to Terna and are located in northern Italy. On the other hand, the 14 nodes with degree greater than 5 of the railway network are located in regions along the Apennines (Tuscany, Emilia Romagna, Marche and Lazio). The analysis of this first index therefore seems to imply that in this region the RFI network is more branched, given the observed concentration of more connected nodes.



Fig. 1 - Porzione d'immagine della rete elettrica italiana elaborata tramite il layout *ForceAtlas2* con il software *Gephi*.
 Fig. 1 - Part of the image of the Italian electrical network produced through the *ForceAtlas2* layout with the *Gephi* software.

estensione presente sul nostro territorio dopo quella di Terna.

5. Individuazione delle porzioni strategiche di infrastruttura e degli archi in sinergia

5.1. Analisi dei nodi tramite gli indici di centralità

Avendo a disposizione il grafo descritto nel paragrafo precedente, possiamo ora studiare l'importanza dei diversi nodi e dei tratti di elettrodotto.

La prima analisi, volta a studiare l'importanza dei singoli nodi, è basata sugli indici di centralità. Analizzare la rete attraverso gli indici di centralità significa valutare quali nodi siano più strategici e più rilevanti. Abbiamo complessivamente utilizzato quattro indici, due basati sul numero di connessioni dei nodi (*"Degree"* e *"Eigenvector Centrality"*) e due basati sul calcolo dei minimi percorsi (*"Closeness Centrality"* e *"Betweenness Centrality"*). L'utilizzo di metodi diversi ci permetterà di confrontare i rispettivi risultati per verificare in qual misura siano concordi. Studiando questi casi è possibile rappresentare la rete in modo simile a quanto illustrato in fig. 1, ma rappresentando i nodi di dimensione proporzionale alla loro importanza: tali rappresentazioni sono riportate in [13].

5.1.1. Degree

Il *Degree* è definito come il numero di archi che connettono un nodo ed è pertanto collegato alla probabilità che un flusso o un'informazione che transita nella rete passino per il nodo in esame. Si tratta dell'indice più semplice e intuitivo, in quanto non tiene conto né della quantità delle connessioni indirette né della qualità delle connessioni.

Le figg. 4 e 5 riportano la distribuzione dei valori di *Degree* rispettivamente per la rete complessiva e per quella delle Ferrovie. Il 65% dei nodi della rete complessiva è nodo "foglia" (grado 1), come le cabine d'utente private, oppure ha un arco in entrata e uno in uscita (grado 2). Solo lo 0,2% dei nodi ha un grado tra 15 e 17: la maggior parte appartiene a Terna ed è localizzato in Italia settentrionale. D'altra parte, i 14 nodi con grado superiore a 5 della rete delle Ferrovie risultano essere localizzati in regioni lungo la dorsale appenninica (Toscana, Emilia Romagna, Marche e Lazio). L'analisi di questo primo indice sembra pertanto indicare che in quest'ultima area geografica la rete RFI sia maggiormente ramificata, data la concentrazione di nodi maggiormente connessi che si osserva.

5.1.2. Eigenvector centrality

L'indice *Degree* consente di identificare il nodo principale in un gruppo sulla base delle connessioni. L'importanza di un vertice non deriva però semplicemente dal fatto che abbia molte connessioni, ma anche dal fatto che esso sia connesso con nodi "importanti". È possibile tenere in considerazione questo aspetto calcolando l'indice *Ei-*

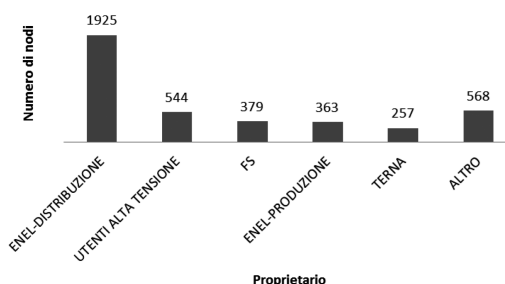


Fig. 2 - I principali proprietari dei nodi (vengono indicati i numeri di nodi posseduti).

Fig. 2 – Primary owners of nodes (shown are the number of nodes owned).

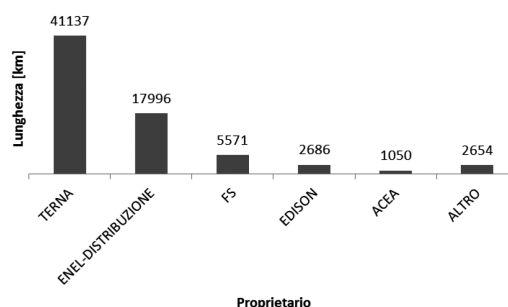


Fig. 3 - I principali proprietari delle linee in alta tensione (vengono indicate le estensioni in km).

Fig. 3 – Primary owners of high voltage lines (shown are the extensions in km).

5.1.2. Eigenvector centrality

The Degree index enables one to identify the root node in a group on the basis of the connections. The importance of a vertex however, does not derive simply from the fact that it has a lot of connections, but also from the fact that it is connected with "important" nodes. It is also possible to take into account this aspect by calculating the Eigenvector Centrality. Analytically, the Eigenvector Centrality of the *i*-th node is defined as the *i*-th component of the eigenvector of greatest magnitude, corresponding to the maximum eigenvalue of the adjacency matrix⁽³⁾. Unlike the Degree index, the distribution of the Eigenvector Centrality values in the graph allows us to see which are the main areas in which a

⁽³⁾ The adjacency matrix, or incidence matrix is a mathematical representation of the graph. It consists of a square matrix having as many rows and columns as the nodes of the graph. Each element of the array is equal to 1 if there is an arc between the two corresponding nodes (or equal to the weight of the arc if the graph is weighted) or equal to 0 otherwise.

eigenvector Centrality. Analiticamente, l'*Eigenvector Centrality* dell'*i*-esimo nodo è definito come l'*i*-esima componente dell'autovettore di modulo massimo, corrispondente all'autovalore massimo della matrice di adiacenza⁽³⁾. A differenza dell'indice *Degree*, la distribuzione dei valori *Eigenvector Centrality* nel grafo ci consente di visualizzare quali siano le aree principali dove ci sia una concentrazione di nodi importanti. Viene pertanto evidenziato ogni nodo che appartiene ad un'area densa di archi (e quindi di collegamenti), mentre i nodi appartenenti ad una zona fortemente polarizzata attorno ad un singolo vertice non risaltano altrettanto.

Questo parametro è ad esempio usato per stabilire una gerarchia tra le pagine internet dai motori di ricerca, mentre nel nostro caso ci consentirà di individuare dove si concentrano i tratti di rete di trasmissione più importanti e meglio integrati. I valori dell'indice sono compresi tra 0 e 1 perché sono normalizzati rispetto al valore massimo: valori elevati possono essere dovuti al fatto che un nodo sia connesso con molti altri nodi oppure con pochi nodi molto importanti.

Concentrandosi sulla rete del gruppo Ferrovie dello Stato, la fig. 6 mostra il diagramma a barre che rappresenta i dieci nodi della rete con valore del parametro *Eigenvector Centrality* più elevato. Rispetto al nodo della rete complessiva avente il massimo valore dell'indice normalizzato e pertanto pari a 1, i valori in figura sono compresi fra 0,29 e 0,17. Riguardo alla localizzazione dei nodi RFI più importanti, la fig. 7 mostra quali siano le regioni in cui si trovano i 30 nodi con i valori dell'indice più elevati. Essi appartengono principalmente a Toscana, Emilia Romagna, Piemonte e Lazio. Vengono pertanto in

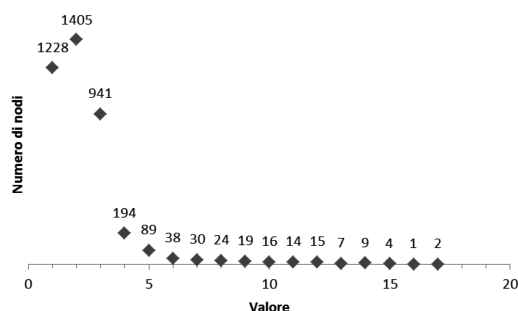


Fig. 4 - Numero dei nodi del grafo complessivo per ciascun valore dell'indice *Degree*.

Fig. 4 - Number of nodes in the overall graph for each value of the *Degree* index.

⁽³⁾ La matrice di adiacenza, o matrice di incidenza, è una rappresentazione matematica del grafo. Consiste in una matrice quadrata avente tante righe e colonne quanti sono i nodi del grafo. Ciascun elemento della matrice è pari a 1 se esiste un arco fra i due nodi corrispondenti (o pari al peso dell'arco se il grafo è pesato) o pari a 0 altrimenti.

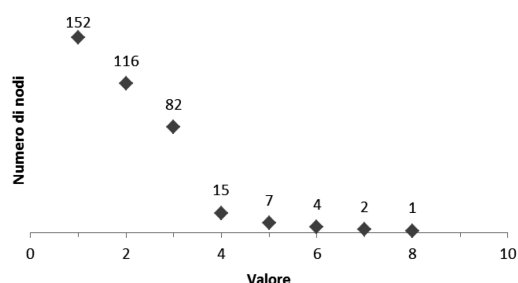


Fig. 5 - Numero dei nodi della porzione di grafo delle Ferrovie per ciascun valore dell'indice *Degree*.

Fig. 5 - Numbers of nodes in the section of the Ferrovie graph for each value of the *Degree* index.

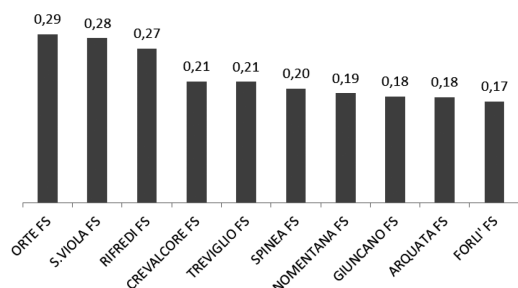


Fig. 6 - I dieci nodi della rete RFI con valore dell'indice *Eigenvector Centrality* più elevato.

Fig. 6 - The ten nodes of the RFI network with the highest value of the *Eigenvector Centrality* index.

concentration of important nodes is present. Herein, each node that belongs to a dense area of arcs (and thus links) is highlighted, while the nodes belonging to an area strongly polarized around a single vertex do not stand out equally.

This parameter is for example used to establish a hierarchy between the web pages by search engines, while in our case it will allow us to identify where the segments of the most important and better integrated transmission network may be found. The index values are between 0 and 1 because they are normalized to the maximum value: high values may be due to the fact that a node is connected to many other nodes, or with a few very important ones.

Focusing on the network of the Ferrovie dello Stato group, Fig. 6 shows the bar graph representing the ten nodes of the network with the higher *Eigenvector Centrality* parameter value. Compared to the overall network node having the maximum value of the normalized index and thus equal to 1, the values in the figure are between 0.29 and 0.17. Regarding the more important location of the nodes of RFI, Fig 7 shows the regions in which there are the 30 nodes with the highest index values. They are found mainly in Tuscany, Emilia Romagna, Piedmont and Lazio. The results of the previous analysis are therefore largely confirmed: in some

buona parte confermati i risultati dell'analisi precedente: in alcune regioni come il Lazio e l'Emilia Romagna ci sono molto probabilmente tratti "pregiati" della rete, data la presenza di nodi con le caratteristiche migliori in termini di connessioni, e quindi di potenziali sinergie con le reti facenti capo ad altri soggetti.

5.1.3. Closeness Centrality e Betweenness Centrality

In questo paragrafo analizzeremo le caratteristiche dei nodi della rete attraverso indici che sono basati sull'analisi dei cammini minimi. Tali indici studiano la centralità (*Centrality*) dei nodi: dal punto di vista intuitivo, se un nodo è più "vicino" di un altro rispetto a tutti i nodi del grafo, allora può essere considerato come un nodo più "centrale". Osserviamo che tale concetto di centralità è molto simile alla nozione di accessibilità propria delle scienze del territorio e dell'ingegneria dei trasporti.

Il primo indice di centralità potenzialmente interessante è la *Closeness Centrality*. La *Closeness Centrality* di un nodo è definita come l'inverso della somma delle distanze del nodo stesso dagli altri nodi con cui è connesso, essendo la distanza tra due vertici a sua volta definita come la somma dei pesi degli archi che li connettono per mezzo del cammino minimo. Nel nostro caso, ricordiamo che i pesi corrispondono a una stima dell'inverso della potenza teorica di ciascun tratto di elettrodotto. Il calcolo della distanza avviene minimizzando il peso, quindi gli archi con i pesi minori corrispondono a tratti di elettrodotto con tensioni, sezioni e numero di tralicci maggiori, ossia aventi maggiori prestazioni. In questo modo, è possibile determinare l'importanza dei nodi considerando non solo la topologia della rete come fin qui fatto, ma anche le caratteristiche dei tratti di infrastruttura che essi connettono.

L'uso di questo indice tuttavia non appare molto appropriato nella nostra applicazione. In presenza di reti di grandi dimensioni, l'intervallo di valori dell'indice tende a ridursi in quanto la distanza media tra due nodi cresce con il logaritmo della dimensione dell'intero network [1]. Tale problema è amplificato nel caso in esame, dove la definizione di peso adottata per il calcolo della distanza non fa riferimento alla localizzazione degli impianti ma è un logaritmo di altre grandezze fisiche, e pertanto la relativa escursione di valori è ulteriormente ridotta [13].

Un indice che offre una misura di centralità più appropriata nel nostro contesto sperimentale è la *Betweenness Centrality*, che corrisponde al rapporto tra il numero di cammini minimi (geodesic paths) tra altri vertici che attraversano il nodo in considerazione e il numero totale di cammini minimi tra gli stessi vertici:

$$C_b(v) = \sum_{s \neq t \neq v \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$

dove $\sigma_{st}(v)$ è il numero di minimi percorsi tra i nodi s e t passanti per v e σ_{st} è il numero di minimi percorsi totali [20]. Il contributo di ciascun percorso che colleghi una

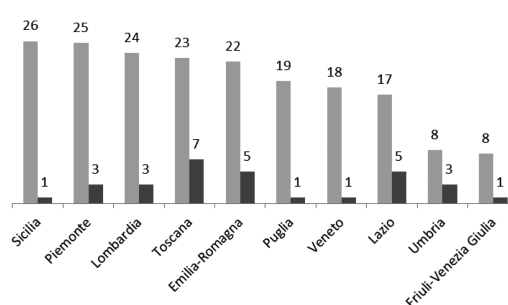


Fig. 7 - Regioni in cui si trovano i 30 nodi della rete del gruppo Ferrovie dello Stato con valore dell'indice *Eigenvector Centrality* più elevato: per ognuna viene indicata la superficie (colonna sinistra, in migliaia di km²) e il numero di nodi (colonna destra). Fig. 7 - Regions where the 30 nodes of the Ferrovie dello Stato group network are present with the highest value of the *Eigenvector Centrality* index: for each one the surface (left column in thousands km²) and the number of nodes (right column) are indicated.

regions such as Lazio and Emilia Romagna there are most likely "valuable" segments of the network, given the presence of nodes with the best characteristics in terms of connections, and therefore of potential synergies with the existing networks of other subjects.

5.1.3. Closeness Centrality and Betweenness Centrality

In this section we analyze the characteristics of the network nodes through indexes that are based on the analysis of shortest paths. These indexes study the centrality of nodes: from the intuitive point of view, if a node is "closer" to another with respect to all nodes of the graph, then it can be considered as a "central" node. We observe that the concept of centrality is very similar to the notion of accessibility typical of territorial sciences and transportation engineering.

The first indication of centrality potentially interesting is Closeness Centrality. The Closeness Centrality of a node is defined as the inverse of the sum of the distances of the node from the other nodes with which it is connected, being the distance between two vertices in turn defined as the sum of the weights of the arcs that connect them by means of the shortest path. In our case, we recall that the weights correspond to an estimate of the inverse of the theoretical power of each section of long-distance line. The distance calculation is done by minimizing the weight, thus the arcs with lower weights correspond to sections of power line with higher voltage, number of sections and triads, i.e. having more performance. In this way, it is possible to determine the importance of the nodes considering not only the topology of the network as hitherto done, but also the characteristics of the sections of infrastructure that they connect.

The use of this index, however, does not seem very appropriate in our application. In the presence of large networks, the range of values of the index tends to decrease as the average distance between two nodes grows with the logarithm of the size of the entire network [1]. This problem is

coppia di nodi e passi per il nodo considerato deve quindi essere pesato rispetto al numero totale di percorsi che collega la coppia di vertici.

I nodi con un valore elevato di *Betweenness Centrality* sono nodi fondamentali per la rete, perché essi “controllano” i flussi che passano attraverso gli altri. Se in un network ci fosse un nodo che appartiene a tutti i minimi percorsi della rete, esso sarebbe il nodo centrale e la rete sarebbe completamente polarizzata attorno ad esso. Nel nostro caso, tale indice è un parametro molto significativo poiché ci permette di individuare quale sia il nodo più “strategico”. L’indice è infatti solitamente utilizzato per studiare la vulnerabilità della rete ai guasti o ad attacchi selettivi ai suoi nodi.

La fig. 8 riporta l’andamento su scala semi-logaritmica del valore dell’indice *Betweenness Centrality* per i nodi della rete del gruppo Ferrovie dello Stato. Dall’andamento del grafico possiamo dedurre che molti vertici (234 su 379) hanno un valore dell’indice nullo o comunque molto prossimo a zero, cioè la maggior parte dei nodi è periferica e quindi poco coinvolta nei minimi percorsi. In base alla definizione dell’indice, osserviamo che nodi della rete “FS” devono la loro importanza alle connessioni sia con altri nodi della stessa rete sia con importanti nodi di Ter-
na.

La fig. 9 rappresenta i dieci nodi della rete del gruppo Ferrovie dello Stato con valore maggiore di *Betweenness Centrality*. Tali valori sono in ogni caso sensibilmente più bassi rispetto a quelli massimi della rete complessiva, dove troviamo 10 nodi con indice compreso fra 0.13 e 0.29. Si tratta di nodi connessi da archi che rappresentano le linee in altissima tensione, appositamente costruite per trasportare l’energia a grandi distanze con lievi perdite e che quindi facilmente fanno parte di un cammino minimo.

Infine, relativamente all’analisi geografica, la fig. 10 mostra le regioni d’appartenenza dei 30 nodi della rete del gruppo Ferrovie dello Stato con valore dell’indice *Betweenness Centrality* maggiore e la corrispondente superficie regionale. Le regioni che hanno il maggior numero di nodi sono regioni centrali, cioè Lazio (10 nodi) e Toscana (5

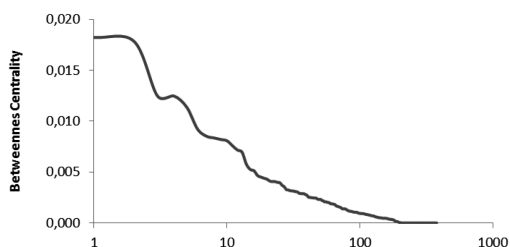


Fig. 8 - Andamento dell’indice *Betweenness Centrality* per i nodi che appartengono alla rete del gruppo Ferrovie dello Stato.
Fig. 8 – Behavior of the *Betweenness Centrality* index related to the nodes belonging to the Ferrovie dello Stato group.

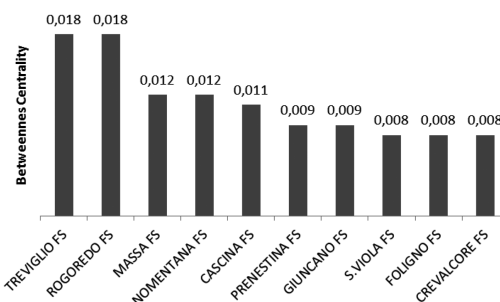


Fig. 9 - Diagramma a barre rappresentante i nodi della rete del gruppo Ferrovie dello Stato con valore del parametro *Betweenness Centrality* più elevato.
Fig. 9 - Bar diagram showing the nodes of the Ferrovie dello Stato group network with the highest *Betweenness Centrality* parameter value.

amplified in the present case, where the definition of weight taken for the calculation of the distance does not refer to the location of the plants but it is a logarithm of other physical quantities, and therefore the relative values of excursion is further reduced [13].

An index which provides a measure of centrality most appropriate in our experimental context is the betweenness centrality, which corresponds to the ratio between the number of shortest paths (geodesic paths) between other vertices that pass through the considered node and the total number of shortest paths between the same vertices:

$$C_B(v) = \sum_{s \neq t \neq v \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$

where $\sigma_{st}(v)$ is the number of minimum routes between nodes s and t passing through v and σ_{st} is the total number of shortest paths [20]. The contribution of each path that connects a pair of nodes and passes through the node in question must then be weighed against the total number of paths that connect the pair of vertices.

Nodes with a high value of betweenness centrality are the key issues for the network, because they “control” flows that pass through others. If in a network there was a node that belongs to all minimum paths of the network, it would be the central node, and the network would be fully polarized around it. In our case, this index is a very important parameter because it allows us to identify which node is more “strategic”. The index is in fact normally used to study the vulnerability of the network with respect to faults or to selective attacks to its nodes.

Fig. 8 shows the trend on a semi-logarithmic scale of the value of *Betweenness Centrality* for the network nodes of the Ferrovie dello Stato group. From the graph behaviour we can deduce that many vertices (234 of 379) have an index value of zero or very close to zero, i.e. most of the nodes are peripheral and therefore scarcely involved in the shortest paths. According to the definition of the index, we observe that the nodes of the network “FS” owe their importance to

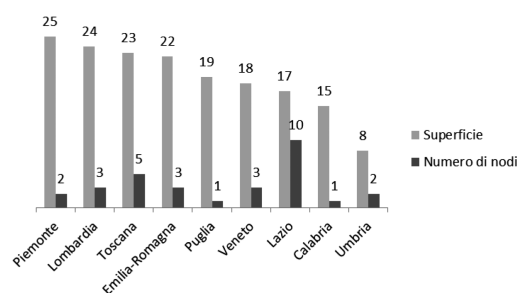


Fig. 10 - Diagramma a barre rappresentante le regioni di appartenenza dei trenta nodi della rete del gruppo Ferrovie dello Stato con valore dell'indice *Betweenness Centrality* maggiore e le corrispondenti superfici regionali (esprese in migliaia di km²).

Fig. 10 – Bar diagram showing the regions containing the thirty nodes of the network of the Ferrovie dello Stato group, with a higher *Betweenness Centrality* index value, and the corresponding regional area surfaces (expressed in thousands of km²).

nodi). Se consideriamo il rapporto tra il numero di nodi che appartengono a una regione e la superficie della stessa, le regioni che ottengono i valori più alti sono il Lazio (0,58), l'Umbria (0,24) e la Toscana (0,22). Per quanto riguarda la regione Umbria, il valore del rapporto è maggiore rispetto ad altri, anche se solo due nodi le appartengono, perché la superficie della regione è piccola. In definitiva, si conferma il risultato osservato nelle precedenti due analisi: le zone che maggiormente sono coinvolte nei minimi percorsi sono quelle centrali del Piemonte, Lombardia, Emilia e Toscana, dove la rete di RFI è presente e ben interconnessa.

5.2. Analisi dei gruppi di nodi e individuazione degli archi in sinergia

Nel paragrafo precedente abbiamo valutato le caratteristiche della rete tramite l'analisi di indici riferiti ai singoli nodi, che ci ha permesso di valutare l'importanza delle infrastrutture puntuali della rete. In questo paragrafo invece analizzeremo i gruppi di nodi, in modo da cercare di descrivere la struttura locale della rete stessa. Analizzando successivamente gli archi che connettono nodi in ciascun gruppo e che appartengono a proprietari diversi, sarà possibile evidenziare sovrapposizioni e possibili sinergie fra tratti di elettrodotto di diversi gestori.

Il problema di ripartire un insieme di elementi in diversi sottoinsiemi sulla base di molteplici caratteristiche ha un enorme interesse applicativo in molti ambiti, che spaziano dagli studi di marketing volti alla definizione dei profili di clienti alla classificazione delle specie in biologia. Corrispondentemente, molti metodi sono stati proposti, dalle tecniche che si basano sulla statistica multivariata (*Cluster Analysis*) alle applicazioni di data mining quali *Decision Trees* e *Support Vector Machines*. Nel nostro caso, adotteremo una metodologia specifica per lo studio delle reti chiamata *Community Detection*. Secondo

connections both with other nodes of the same network and with significant nodes of Terna.

On fig. 9 the ten nodes of the network of the Ferrovie dello Stato group are shown with the maximum value of *Betweenness Centrality*. These values are in any case much lower than the maximum overall network, where there are 10 nodes with an index between 0.13 and 0.29. These are nodes connected by arcs that represent the lines with very high-voltage, specially built for transporting energy to large distances with minimal losses and therefore easily form part of a shortest path.

Finally, regarding geographical analysis, fig. 10 shows the regions of membership of the 30 nodes of the Ferrovie dello Stato group with a greater index value of *Betweenness Centrality*, and the corresponding surface region. The regions that have the highest number of nodes are central regions, i.e., Lazio (10 nodes) and Tuscany (5 nodes). If we consider the ratio between the number of nodes that belong to a region and the surface of that region, the regions that receive the highest values are Lazio (0.58), Umbria (0.24) and Tuscany (0.22). Regarding the Umbria region, the value of the ratio is greater than others, even if only two nodes belong to it, because the surface of the region is small. Ultimately, the result observed in the previous two analyses is confirmed: the areas which are more involved in the smallest paths are those in the center of Piedmont, Lombardy, Emilia and Tuscany, where the network of RFI is present and well interconnected.

5.2. Analysis of groups of nodes and determination of synergy arcs

In the previous section we evaluated the characteristics of the network through the analysis of indexes referring to individual nodes, which allowed us to assess the importance of punctual infrastructures of the network. In this section we will analyze the groups of nodes, so as to try to describe the local structure of the network itself. By successively analyzing the arcs that connect the nodes within each group and that belong to different owners, it will be possible to identify overlaps and possible synergies between power line sections of different operators.

The problem of allocating a set of elements in different subsets based on multiple features has potential for applications in many fields, ranging from marketing studies aimed at defining the profiles of customers to the classification of species in biology. Correspondingly, many methods have been proposed, from the techniques that are based on multivariate statistical analysis (cluster analysis) to data mining applications such as *Decision Trees* and *Support Vector Machines*. In our case, we will adopt a specific methodology for the study of networks called *Community Detection*. According to the terminology used in the literature in the field, a group of nodes is identified with a "good sharing" when there are many arcs connecting nodes within the group and a few ones that connect the external ones, compared to the average values expected on the basis of total connectivity of the network [21]. There-

la terminologia in uso nella letteratura del settore, un gruppo di nodi è individuato con una “buona divisione” quando sono molti gli archi che connettono i nodi interni al gruppo e pochi quelli che connettono quelli esterni, rispetto ai valori medi attesi sulla base della connettività totale della rete [21]. Definiamo pertanto l'indice *Modularity*, a meno di una costante moltiplicativa, come la differenza tra il numero di archi che cadono all'interno di un gruppo e il numero atteso, considerando una rete equivalente dove gli archi sono casualmente distribuiti tra coppie di nodi.

I valori di *Modularity* possono essere sia positivi che negativi, dove i primi indicano una presenza di caratteristiche comuni al gruppo. Quindi è possibile risolvere il problema del *Community Detection* attraverso l'analisi del parametro *Modularity*, in quanto ogni gruppo è legato da uno stesso valore: i nodi della rete saranno divisi in *Modularity Classes*, ossia in classi di nodi caratterizzati dall'avere uno stesso valore di *Modularity*. Pertanto, le *Modularity Classes* non sono altro che gruppi di nodi caratterizzati dal fatto che le connessioni tra i membri del gruppo sono molto più numerose rispetto alle connessioni di tali membri con nodi appartenenti agli altri gruppi. Un gruppo è tanto più definito quanto più ha un valore positivo ed elevato dell'indice: la partizione della rete avviene massimizzando il valore di *Modularity*, che misura la forza con cui i gruppi sono separati.

Nell'ambito della presente ricerca, procederemo a partizionare la rete in gruppi e a verificare la presenza di nodi della rete delle Ferrovie all'interno di ciascun gruppo, in modo tale da evidenziare possibili sinergie. Nel nostro caso sono sostanzialmente due i fattori che contribuiscono a far aumentare il valore di *Modularity* di un gruppo, e pertanto a renderlo più coeso rispetto al resto della rete: la presenza di molte linee di trasmissione in una zona geografica limitata e il fatto che tali linee siano per lo più di un unico proprietario, dato che ogni rete connette principalmente i propri nodi, al netto delle interconnessioni.

Applicando l'algoritmo di *Community Detection* disponibile in Gephi, i nodi della rete sono stati divisi in 81 classi caratterizzate ciascuna da un valore di *Modularity*; per praticità, identificheremo ciascuna classe con tale valore. Nell'interpretazione dei risultati occorre però considerare che piccoli tratti di elettrodotto che costituiscono le “foglie” della rete possono avere alti valori di *Modularity* in quanto le loro connessioni con il resto della rete sono molto inferiori rispetto agli altri tratti di rete di trasmissione ma non presentano alcun interesse nella nostra analisi. Pertanto, in seguito considereremo solo gruppi composti da almeno 10 nodi, che risultano essere 31 dei precedenti 81, e ci soffermeremo in particolare sui gruppi in cui la presenza di elettrodotti delle Ferrovie è significativa. A titolo di esempio, riportiamo in fig. 11 la porzione di rete in Italia centro-settentrionale con la rappresentazione di tali gruppi.

fore we define the *Modularity index factor* as the difference between the number of arcs that fall within a group and the expected number, considering an equivalent network where the arcs are randomly distributed between pairs of nodes.

The values of *Modularity* can be both positive and negative, where the former indicate a presence of features common to the group. It is then possible to solve the problem of *Community Detection* through the analysis of the *Modularity* parameter, as each group is linked by a single value: the nodes of the network will be divided into *Modularity Classes*, i.e. classes of nodes characterized by having the same value of *Modularity*. Therefore, *Modularity Classes* are nothing but groups of nodes characterized by the fact that the connections between the group members are much more numerous than the connections of these members with nodes belonging to the other groups. A group is much better defined as a higher positive value and a high index is present: the network partition occurs by maximizing the value of *Modularity*, which measures the force with which the groups are separated.

As part of this research, we will proceed to partition the network into groups of nodes and verify the presence of the railway network within each group, in such a way as to highlight potential synergies. In our case there are essentially two factors that contribute to increase the value of *Modularity* of a group, and thus to make it more cohesive than the rest of the network: the presence of many transmission lines in a limited geographical area and the fact that these lines are mostly of a single owner, as each network connects primarily to its nodes, net of interconnections.

Applying the algorithm of *Community Detection* available in Gephi, the nodes of the network were divided into 81 classes, each one characterized by a value of *Modularity*; for convenience, we will identify each class with that value. In interpreting the results should be considered that small stretches of power lines that constitute the “leaves” of the network may have high values of *Modularity* in that their connections with the rest of the network are much lower compared to the other sections of the transmission network but does not have any interest in our analysis. Therefore, in the following we will consider only groups of at least 10 nodes, which are 31 of the previous 81, and we will focus in particular on the groups in which the presence of long-distance lines of Ferrovie dello Stato is significant. As an example in fig. 11, the portion of the network in central and northern Italy with the representation of these groups is shown.

From the analysis it emerges that the groups defined by the algorithm with at least 10 nodes and where the presence of the network “FS” is most relevant are classes 29, 37, 35, 69, 49, and 52 among the 31 previously identified. Fig. 12 shows the number of nodes within each class (or group) divided by the property. The three principal owners to 2002 were considered separately (Terna, Enel Distribution and the Ferrovie dello Stato group), while the remaining were considered grouped.

By verifying the geographical location within the

Emerge dall'analisi che i gruppi definiti dall'algoritmo con almeno 10 nodi e dove la presenza della rete "FS" è maggiormente rilevante sono le classi 29, 37, 35, 69, 49, e 52 fra le 31 precedentemente individuate. La fig. 12 riporta il numero di nodi all'interno di ciascuna classe (o gruppo) suddivisi in base alla proprietà. Sono stati separatamente considerati i tre principali proprietari al 2002 (Terna, Enel Distribuzione e il gruppo Ferrovie dello Stato), mentre i rimanenti sono stati raggruppati.

Verificando quindi la localizzazione territoriale in ambito provinciale di questi gruppi, notiamo che le relative aree geografiche sono fra loro contigue e coprono una fascia di territorio della penisola che dal Trentino scende verso la dorsale appenninica (fig. 13). I risultati delle precedenti analisi vengono pertanto ancora una volta confermati.

Sulla base dei risultati concordi di tutte le precedenti analisi, la tabella 1 propone pertanto uno specchio riassuntivo dei casi di sinergia evidenziati dalla nostra analisi, indicando per ognuno dei sei gruppi individuati il tratto di elettrodotto delle Ferrovie nonché il proprietario, la tensione, il tipo di conduttore, il numero di terne e l'appartenenza o meno alla rete di trasmissione nazionale del tratto di rete alternativa all'interno dello stesso gruppo. Nella scelta di questi ultimi abbiamo considerato solo i tratti di rete di altri proprietari che sono quasi paralleli a quelli delle Ferrovie, tralasciando quelli con minor punti di contatto o con un tracciato diverso.

Come si può notare, i tratti di reti in alta tensione con cui sono state individuate le sinergie sono di proprietà di Terna; in alcuni casi, si tratta di elettrodotti già appartenenti

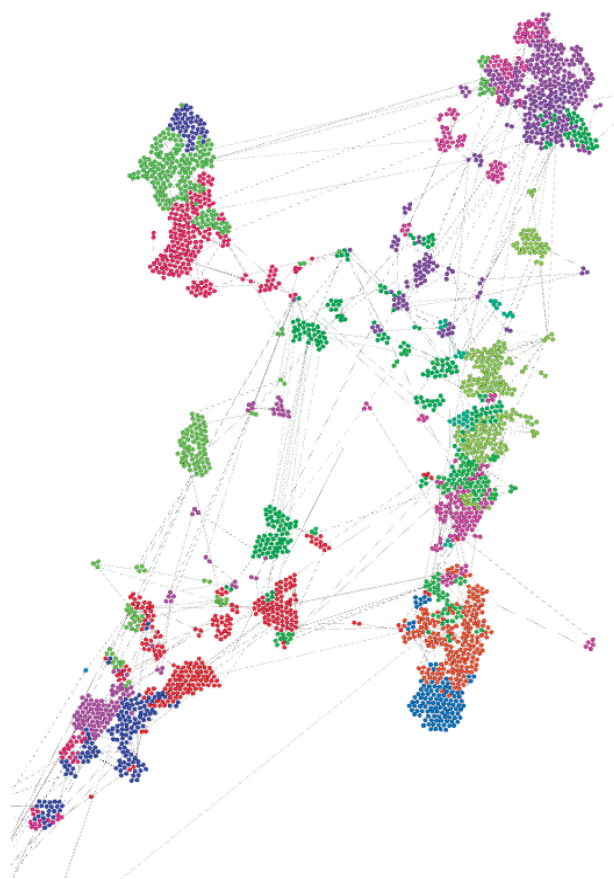


Fig. 11 - Porzione di rete nel centro-nord della penisola, in cui sono rappresentate in colori diversi le Modularity Classes composte da almeno dieci nodi.
Fig. 11 - Portion of the north-central network of the peninsula where the Modularity Classes composed by at least 10 nodes are represented by different colors.

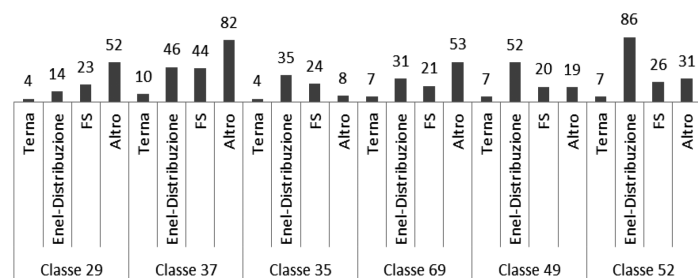


Fig. 12 - Numero di nodi per proprietario nei sei gruppi in cui la presenza di FS è maggiormente rilevante.
Fig. 12 - Number of nodes per owner in the six groups where the presence of FS is highly relevant.

province of these groups, we note that the relevant geographic areas are contiguous to each other and cover a territory of the peninsula that from Trentino descends toward the Apennine ridge (fig. 13). The results of the above analyses are therefore once again confirmed.

Based on the results consistent with all the previous analyses, table 1 proposes a summary of cases of synergy revealed by our analysis, indicating for each of the six groups identified in the section of the power line and the owner of Railways, the voltage, the type conductor, the number of triads and the belonging or not belonging to the national

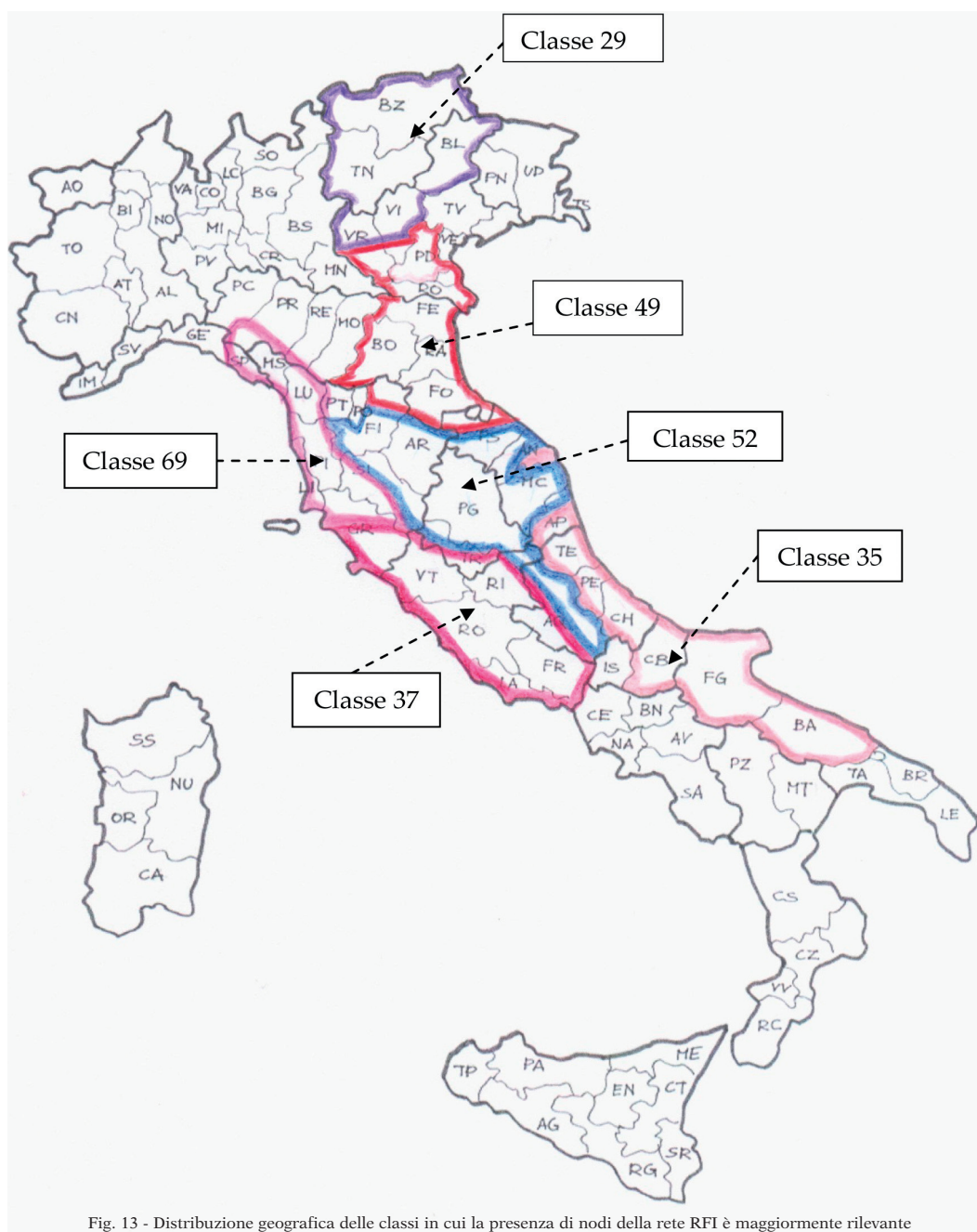


Fig. 13 - Distribuzione geografica delle classi in cui la presenza di nodi della rete RFI è maggiormente rilevante (assetto delle provincie al 1995).
 Fig. 13 – Geographical distribution of the classes where the presence of nodes of the RFI network is the greatest (set up of provinces as of 1995).

TABELLA 1 – TABLE 1

RIEPILOGATIVA DELLE CARATTERISTICHE DELLE RETI CON CUI SONO STATE INDIVIDUATE POSSIBILI SINERGIE CON LA RETE DEL GRUPPO FERROVIE DELLO STATO
 OF THE NETWORK CHARACTERISTICS WHERE POSSIBLE SYNERGIES WITH THE NETWORK OF THE FERROVIE DELLO STATO GROUP HAVE BEEN IDENTIFIED

Elettrodotto RFI <i>RFI long-distance line</i>	Proprietario del tratto maggiormente in sinergia <i>Owner of the power line section with highest synergy</i>	Tensione Voltage	Conduttore Conductor	N° di terne N° of triads	RTN
Orvieto Fs - Rifredi Fs	Terna	132 kV	Aereo Overhead	1	Si Yes
Jesi Fs - Giuncano Fs	ex Enel Distribuzione	132 kV	Aereo Overhead	1	No No
Grosseto Fs - Follonica Fs	Terna	132 kV	Aereo Overhead	1	Si Yes
Foggia Fs - Pescara Fs	ex Enel Distribuzione	132 kV	Aereo Overhead	1	No No
Riccione Fs - Portomaggiore Fs	ex Enel Distribuzione	132 kV	Aereo Overhead	1	No No
Ala Fs - Brennero Fs	Terna	132 kV	Aereo Overhead	2	Si Yes

a Enel Distribuzione. In definitiva, attraverso la metodologia di analisi proposta è stato illustrato ad esempio come sia possibile attraverso il metodo proposto identificare i partner migliori per possibili piani di sviluppo congiunti o accordi di compravendita. Le linee individuate sono con tensione pari a 132 kV, con conduttore aereo, con una singola terna (ad eccezione dell'ultima) e tre di esse al 2002 facevano parte della Rete di Trasmissione Nazionale.

6. Conclusioni

La rete elettrica in alta tensione del gruppo Ferrovie dello Stato fu inizialmente concepita come parte di un vero e proprio sistema energetico. Parallelamente all'elettrificazione delle linee di trazione ferroviaria, le Ferrovie dello Stato si preoccuparono infatti nel corso del XX secolo di realizzare impianti per la produzione di energia e un'infrastruttura che ne consentisse il trasferimento dagli impianti di produzione agli impianti di alimentazione della trazione ferroviaria. A seguito della nazionalizzazione del settore elettrico, la rete venne utilizzata soprattutto per l'approvvigionamento e in misura minore per il trasporto dell'energia: l'alimentazione della linea di contatto spesso avviene passando per le numerose interconnessioni tra le sottostazioni ferroviarie e la Rete di Trasmissione Nazionale.

Le recenti tendenze alla liberalizzazione e all'apertura del mercato dell'energia elettrica e parallelamente al riordino della rete di trasmissione nazionale si traducono nell'opportunità per le Ferrovie di rivedere la loro attività nel settore, riconsiderando il proprio posizionamento strategico in questo mercato e perseguendo obiettivi di efficienza economica se non di profitto. Per far questo, si rendono necessarie analisi non solo di tipo "eletrotecnico" sul-

transmission grid of the alternative network section within the same group. In choosing the latter, we considered only the sections of the network of other owners that are almost parallel to those of Ferrovie, leaving those with less contact points or with a different layout.

As one can see, the sections of high voltage grids where synergies have been identified are owned by Terna; in some cases, these are power lines already owned by Enel Distribuzione. Ultimately, through the methodology of analysis proposed it has been shown for example that it is possible through the proposed method to identify the best partners for possible joint development plans or agreements of sale. The identified lines are characterized by a voltage of 132 kV, overhead conductors and single triad (except the last), and three of them were part of the National Transmission Network in 2002.

6. Conclusions

The high-voltage electrical network in the Ferrovie dello Stato group was originally conceived as part of a true energy system. In parallel to the electrification of the railways, the Ferrovie dello Stato during the course of the twentieth century were concerned in fact in the construction of facilities for the production of energy and an infrastructure that would have allowed the transfer from the production plants to power systems for railway traction. Following the nationalization of the electricity sector, the network was used predominantly for the supply and to a lesser extent for the transport of energy: the power supply of the contact line is often done through the many interconnections between substations and the National Transmission network.

Recent trends towards liberalization and the opening of the electricity market and parallel towards the reorganization of the national transmission grid result in the opportu-

l'infrastruttura di proprietà di RFI, dato che è anche necessario meglio comprenderne la valenza nel quadro della rete di trasmissione nazionale ad alta tensione.

Per far questo, abbiamo costruito un modello di rappresentazione dell'insieme delle reti in alta tensione presenti sul territorio nazionale, in cui abbiamo contestualizzato la rete del gruppo Ferrovie dello Stato.

La nostra analisi individua quali siano i punti strategici della rete del gruppo Ferrovie dello Stato utilizzando la *Network Analysis* e, in seguito, identifica tratti in cui la stessa potrebbe essere utilizzata in sinergia con reti di altri proprietari. Emerge chiaramente che i nodi più importanti della rete, aventi un maggior numero di connessioni "qualificate", si trovano su linee di transito importanti e sono situati nella parte centro-orientale della penisola, in regioni come il Lazio, l'Umbria, le Marche, la Toscana e l'Emilia Romagna. Inoltre, abbiamo individuato in tali regioni sei porzioni di elettrodotto quasi "in parallelo" con altre infrastrutture di Terna (in alcuni casi precedentemente appartenenti a Enel Distribuzione), in cui gli indicatori analitici considerati mostrano chiare possibilità di sinergia. In questi casi potrebbe ad esempio essere possibile che nuovi impianti privati per la produzione di energia si allaccino alla rete del gruppo Ferrovie dello Stato per immettere la propria produzione. In caso poi di compravendita di elettrodotti, una loro corretta valorizzazione non dovrebbe prescindere dagli aspetti che abbiamo messo in luce.

In conclusione, la rete di trasmissione del gruppo Ferrovie dello Stato può offrire un contributo decisivo nell'offerta di capacità di trasmissione di corrente elettrica soprattutto nella parte centrale dell'Italia, dove la presenza di altre linee di trasmissione è meno forte. In un momento storico in cui la carenza di credito rende difficili gli investimenti anche nel settore delle infrastrutture, ci sembra importante cercare di impiegare al meglio le risorse già disponibili. Questo lavoro propone soluzioni concrete per l'utilizzo della rete elettrica del gruppo Ferrovie dello Stato alla luce di analisi basate su tecniche innovative nate nell'ambito delle scienze sociali, ma che hanno trovato applicazione anche nelle analisi ingegneristiche.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare l'Ing. Fabio FRESCHI del Politecnico di Torino e il Dott. Carlo CAPUTO, il Dott. Sergio IACOMI e il Sig. Domenico PEDALINO di RFI per il supporto e l'assistenza fornita nelle varie fasi della ricerca descritta in questo articolo e per l'attenta lettura delle bozze del presente articolo.

for the Railways to review their activities in the field, reconsidering its strategic positioning in this market and pursuing objectives of economic efficiency if not profit. To do this would require a type analysis not only "electrical" on the infrastructure owned by RFI, since it is also necessary to better understand its significance in the context of the national transmission high voltage grid.

To do this, we built a model of representation of all the high voltage grids throughout the country, where we contextualized the network of the Ferrovie dello Stato group.

Our analysis identifies what are the strategic points in the network of the Ferrovie dello Stato group using the Network Analysis and, later, identifies sections where the same could be used in synergy with the networks of other owners. It is clear that the most important nodes of the network, with a greater number of "qualified" connections are located on major transit lines and are located in the east-central part of the peninsula, in regions such as Lazio, Umbria, Marche, Tuscany and Emilia Romagna. In addition, we have identified in these regions almost six sections of power line almost "in parallel" with other Terna infrastructures (in some cases previously belonging to Enel Distribuzione), in which the analytical indicators considered show clear opportunities for synergy. In these cases, it may for example be possible the connection of new private plants for the production of energy to the network of the Ferrovie dello Stato group to enter their production. In case of sale of power lines then, a correct estimation should not disregard the aspects above highlighted.

In conclusion, the transmission network of the Ferrovie dello Stato group can offer a decisive contribution in offering power transmission capacity especially in the central part of Italy, where the presence of other transmission lines is less strong. In a historical moment in which the lack of credit also makes it difficult investment in the infrastructure sector, it seems important to try to make best use of the resources already available. This paper proposes practical solutions for the use of the power grid of the Ferrovie dello Stato group in the light of analyses based on innovative techniques born in the social sciences, which have found application in engineering analysis.

Acknowledgements

The authors wish to thank Ing. Fabio FRESCHI, Turin Polytechnic, and Dr. Carlo CAPUTO, Dr. Sergio IACOMI and Mr. Domenico PEDALINO of RFI for the support and assistance provided at various stages of the research described in this article and for his careful reading of the drafts of this article.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M.E.J. NEWMAN, "Networks: An Introduction", Oxford, Oxford University Press, 2010.
- [2] Commissione Europea, "Comunicazione della Commissione: Energia 2020 - Una strategia per un'energia competitiva, sostenibile e sicura", 10 Novembre 2010.

- [3] Commissione Europea, "Comunicazione della Commissione: una politica energetica per l'Europa", 10 Gennaio 2007.
- [4] Commissione Europea, "Comunicazione della Commissione: una tabella di marcia verso un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio nel 2050", 8 Marzo 2011.
- [5] Commissione Europea, "Proposal of a regulation of the European Parliament and of the council on guidelines for trans-European energy infrastructure", 19 Ottobre 2011.
- [6] Commissione Europea, "Comunicazione della Commissione: Reti intelligenti - Dall'innovazione all'introduzione", 12 Aprile 2011.
- [7] Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas, "Delibera n. 151/02: Riconoscimento di diritti di accesso a titolo prioritario alla capacità di trasporto sulla rete elettrica di interconnessione con l'estero, ai sensi dell'articolo 10, comma 2, del decreto legislativo 16 marzo 1999 n. 79", 2002.
- [8] A. PROJETTI, C. SPALVIERI, "Merchant lines": esigenza di import energetico e opportunità per R.F.I.", La Tecnica Professionale, CIFI - Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 2004, n.4, p. 5-10.
- [9] A. FUMI, S. IACOMI, V. SALVATORI, "L'alimentazione delle linee di trazione elettrica delle Ferrovie dello Stato", Ingegneria Ferroviaria, CIFI - Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 1991, n. 12, p. 719-728.
- [10] S. IACOMI, "Approvvigionamento di energia elettrica e alimentazione delle linee di trazione delle Ferrovie dello Stato", La Tecnica Professionale, CIFI - Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 1998, n. 11, p. 35-44.
- [11] Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A., "Rapporto di sostenibilità", 2010.
- [12] Decreto Legislativo 1° Giugno 2011, n. 93, "Titolo III: Mercato dell'energia elettrica – Art. 36, commi 9 e 10", 2011.
- [13] I. MACAGNO, "La rete elettrica ferroviaria italiana: Prospettive di sviluppo e di integrazione con reti di altri gestori e per il trasporto di energia prodotta da parchi eolici", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2012.
- [14] D.J. WATTS, S.H. STROGATZ, "Collective dynamics of "small-world" networks", Nature, 1998, Vol. 393, n. 6, pp. 440-442.
- [15] L.A.N. AMARAL, A. SCALA, M. BARTHÉLÉMY, H.E. STANLEY, "Classes of small-world networks", Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, Vol. 97, n. 21, pp. 11149-11152.
- [16] P. CRUCITTI, V. LATORA, M. MARCHIORI, "A topological analysis of the Italian electric power grid", Physica, 2004, Vol. 338, pp. 92-97.
- [17] I. DOBSON, B.A. CARRERAS, V.E. LYNCH, D.E. NEWMAN, "Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, critical points, and self-organization", Chaos, 2007, Vol. 17, n. 2, 13pp.
- [18] Z. WANG, A. SCAGLIONE, R.J. THOMAS, "Electrical centrality measures for electric power grid vulnerability analysis", 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Dicembre 2010, pp. 5792-5797.
- [19] G.A. PAGANI, M. AIELLO, "Power grid network evolutions for local energy trading", Rapporto di ricerca dell'8 Gennaio 2012, disponibile presso l'archivio aperto della Cornwell University (<http://arxiv.org/>).
- [20] U. BRANDES, "A faster algorithm for betweenness centrality", Journal of Mathematical Sociology, 2001, Vol. 25, n. 2, pp. 163-177.
- [21] M.E.J. NEWMAN, "Modularity and community structure in networks", Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, Vol. 103, n. 23, pp. 8577-8582.