



## UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni,  
Matematica e Automatica

Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici  
Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/33

### ANALISI DI SCENARI RELATIVI ALLA MESSA IN SERVIZIO DEL NUOVO COLLEGAMENTO A 380KV SORGENTE- RIZZICONI (II) E DI ALTRE INTERCONNESSIONI AT NELL'AREA DEL MEDITERRANEO

IL DOTTORE  
ING. ANDREA PUCCIO

IL COORDINATORE  
PROF. MARIA STELLA MONGIOVI'

IL TUTOR  
PROF. MARIANO GIUSEPPE IPPOLITO

CO TUTOR  
ING. GIOVANNI FILIPPONE

CICLO XXVI  
ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO 2016

*Alla mia famiglia.*  
*Supporto continuo, fonte di ispirazione, motore ed asse portante della mia vita.*



## **Ringraziamenti**

*Ringrazio con somma gratitudine e sincero affetto i miei due Tutor. Il Prof. Mariano Giuseppe Ippolito per il supporto e la disponibilità dimostratami in tutto il triennio, e l'ing. Giovanni Filippone per l'aiuto continuo e la sua amicizia, fondamentale per alcune fasi del lavoro svolto.*

*Un affettuoso ringraziamento va anche ai Professori Favuzza, Massaro e Zizzo per tutte le collaborazioni maturate in questi anni e per il rapporto di stima, amicizia e fiducia creatosi.*

*Allo stesso modo i miei ringraziamenti vanno sicuramente estesi a tutto il gruppo ING-IND/33, e a tutte le persone con le quali ho collaborato per la stesura di alcune parti di questo lavoro.*

*Un doveroso ringraziamento va al Prof. Guido Ala, ed all'ing. Salvatore Ganci per la collaborazione relativa all'ultima parte di questa tesi.*

*Un sentito grazie va anche al Professor Massimo Bongiorno per la Sua ospitalità e la Sua disponibilità durante tutto il periodo all'estero svolto dal sottoscritto presso la Chalmers University of Technology di Göteborg.*

*Un grazie davvero speciale va ai colleghi Paternò e Madonia per il supporto e l'aiuto con il software Neplan<sup>®</sup>.*

*Un ringraziamento sentito va anche all'amico e collega Filippo Pellitteri per aver condiviso con me ogni vicenda associata a questi tre anni di dottorato, e per essere stato un validissimo termine di paragone ed un prezioso stimolo a migliorare sempre.*

*Infine, voglio ringraziare tutti coloro che in questi anni mi sono stati vicini ed in particolare la mia famiglia che, come sempre, mi ha incoraggiato e spronato a dare il mio meglio ed a supportarmi, riponendo fiducia in me e nel mio operato.*



# Indice

---

Indice delle figure .....	1
Indice delle tabelle.....	4
Lista Acronimi .....	6
Abstract.....	7
1 Introduzione .....	8
1.1 Contesto .....	8
1.2 Linee di ricerca ed articolazione capitoli .....	9
2 Analisi tecnica sull'attuale rete AT in Sicilia .....	12
2.1 Rete AT siciliana.....	12
2.2 Conduttori aerei utilizzati sulle linee AT in Sicilia.....	14
2.3 La produzione di energia elettrica nell'isola.....	16
2.4 Fabbisogno mensile nell'isola negli ultimi anni .....	17
2.5 L'attuale Sorgente-Rizziconi I.....	18
3 Il futuro Sorgente-Rizziconi II.....	22
3.1 Descrizione di massima dell'opera .....	22
3.2 Descrizione tecnica delle opere e stato di avanzamento dei lavori.....	24
3.2.1 Opere nel versante siciliano.....	25
3.2.2 Collegamento in cavo 380kV DT Villafranca Tirrena – Scilla .....	25
3.2.3 Opere nel versante calabro .....	27
3.3 Foto relative al nuovo collegamento.....	27
4 Nuove tecniche per l'incremento delle FER in Sicilia.....	30

4.1	Sistemi real-time .....	30
4.1.1	I sistemi DTR (Dynamic Thermal Rating) .....	31
4.1.2	Modello termico – meccanico .....	32
4.1.3	Ampacimon .....	35
4.2	Sistemi off-line.....	38
4.2.1	Sistemi georeferenziati per l’incremento della portata degli elettrodotti.....	38
4.2.1.1	I sistemi GIS e LIDAR.....	38
4.2.1.2	Applicazioni della tecnologia LIDAR sulla rete AT siciliana....	41
4.2.1.3	Risultati .....	42
4.2.2	I conduttori HTLS per l’incremento della portata degli elettrodotti .....	45
4.2.2.1	Conduttori HTLS di riferimento.....	46
4.2.2.2	Determinazione della portata in corrente di elettrodotti AT .....	50
4.2.2.3	Risultati .....	53
5	Analisi di Power Flow sulla rete AT siciliana .....	57
5.1	Struttura e modello della rete elettrica di trasmissione siciliana.....	58
5.1.1	Nodi della rete modello .....	59
5.1.2	Linee e Trasformatori presenti nella rete modello.....	59
5.1.3	Unità produttive presenti nella rete modello .....	60
5.1.4	Carichi presenti nella rete modello e alimentazione da continente .....	60
5.2	Analisi di scenari in diverse condizioni di esercizio.....	61
5.2.1	Scenario 1: Attuale Sorgente-Rizziconi in esercizio, grossa produzione da GD ed export.....	61
5.2.1.1	Condizione Standard: export di 200MW verso il continente .....	61
5.2.1.2	Export di 600MW verso il continente .....	62
5.2.1.3	Export di 650MW verso il continente .....	62
5.2.1.4	Export di 750MW verso il continente .....	62

5.2.2	Scenario 2: Attuale e futuro Sorgente-Rizziconi in esercizio, grossa produzione da GD ed export.....	63
5.2.2.1	Condizione Standard: Export di 200MW verso il continente ....	63
5.2.2.2	Export di 600MW verso il continente .....	63
5.2.2.3	Export di 650MW verso il continente .....	63
5.2.2.4	Export di 750MW verso il continente .....	64
5.2.3	Confronto tra gli scenari 1 e 2 .....	64
5.2.4	Scenario 3: attuale e futuro Sorgente-Rizziconi in esercizio, carico coperto da potenza da fonte tradizionale e massimo export da GD .....	65
5.2.4.1	Condizione 1: export di 1000MW verso il continente .....	65
5.2.4.2	Condizione 2: export di 1600MW verso il continente .....	65
5.2.5	Scenario 4: Attuale e futuro Sorgente Rizziconi in esercizio, grossa produzione da GD ed apertura linea 380kV Sorgente - Paternò. ....	66
5.3	Incremento delle FER in Sicilia attraverso l'uso di conduttori HTLS.....	67
5.3.1	Determinazione delle condizioni di carico e di produzione .....	68
5.3.2	Scelta dei conduttori HTLS, e determinazione della massima freccia per linee aeree a 150kV .....	69
5.3.3	Calcolo della nuova corrente per le linee dove si sono sostituiti i conduttori tradizionali con quelli ad alta capacità di trasporto.....	70
5.3.4	Calcolo della nuova massima potenza esportabile con i conduttori HTLS .....	73
6	La Sicilia come hub elettrico nel mediterraneo.....	74
6.1	Rete elettrica mediterranea al 2015.....	74
6.1.1	Le attuali interconnessioni presenti nel mediterraneo .....	75
6.1.2	La rete elettrica di trasmissione siciliana al 2015 ed export verso il continente .....	75
6.2	Condizioni di Import-Export all'interno della rete AT Euro-Mediterranea ..	77



6.2.1 Rete elettrica siciliana al 2020.....	77
6.2.2 Rete elettrica mediterranea al 2020 .....	78
6.2.3 Condizioni di carico, generazione ed export al 2020, e scenari proposti	79
6.2.4 Scenari simulati al 2020 .....	80
6.3 Risultati .....	80
6.4 Considerazioni sulle tensioni ai nodi .....	81
7 Valutazione dei campi magnetici ed uso di tecniche di mitigazione in relazione al Sorgente-Rizziconi II.....	83
7.1 Mitigazione del campo magnetico prodotto da una linea aerea a 150kV .....	83
7.1.1 Calcolo dell'induzione magnetica .....	84
7.1.2 Metodi di mitigazione del campo magnetico per line aeree di trasmissione .....	86
7.1.2.1 Ri-arrangiamento delle fasi .....	86
7.1.2.2 Uso di circuiti passivi .....	87
7.1.3 Risultati.....	88
7.2 Mitigazione del campo magnetico prodotto da una linea in cavo a 380kV ...	92
7.2.1 Metodi di mitigazione del campo magnetico per linee in cavo .....	93
7.2.2 Uso di schermi per la riduzione del campo magnetico.....	94
7.2.2.1 Uso di schermi ferromagnetici .....	94
7.2.2.2 Uso di schermi conduttivi.....	95
7.2.3 Risultati.....	95
7.3 Determinazione del campo elettrico per una linea a 380kV .....	100
Conclusioni .....	103
Bibliografia .....	104

# Indice delle figure

---

Figura 1. Rete elettrica in alta tensione siciliana e legenda .....	14
Figura 2. Caratteristiche conduttore ACSR 22.8mm.....	15
Figura 3. Caratteristiche conduttore ACSR 31.5mm.....	15
Figura 4. Potenza nominale installata in Sicilia collegata alla rete AT .....	16
Figura 5. Potenza nominale prodotta da FER allacciata alla rete AT.....	17
Figura 6. Fabbisogno massimo medio mensile anni 2010 → 2015.....	17
Figura 7. Fabbisogno minimo medio mensile anni 2010 → 2015.....	18
Figura 8. Differenza dei fabbisogni medi .....	18
Figura 9. Schema unifilare Sorgente-Rizziconi I.....	19
Figura 10. Sezione di cavo terrestre Sorgente-Rizziconi I .....	20
Figura 11. Schema unifilare Sorgente-Rizziconi II .....	22
Figura 12. Descrizione tecnica dell'opera .....	24
Figura 13. Inquadramento geografico dell'opera .....	24
Figura 14. Tracciato cavi lato Sicilia .....	26
Figura 15. Tracciato in cavo doppia terna marino .....	26
Figura 16. Tracciato cavi lato Calabria.....	27
Figura 17. Panoramica dell'opera vista dal lato calabro dello stretto.....	28
Figura 18. Montaggio di un traliccio attraverso l'uso del falcone.....	28
Figura 19. Trasporto di sostegni tubolari.....	29
Figura 20. Montaggio di sostegni tubolari.....	29
Figura 21. Architettura di un sistema DTR.....	31
Figura 22. Donut installato su un conduttore di fase .....	32
Figura 23. Dispositivo Ampacimon.....	36
Figura 24. Catenaria di un conduttore con attacchi a dislivello.....	36
Figura 25. Schema a blocchi costruzione sistemi GIS.....	38
Figura 26. Modalità di esecuzione del rilievo LIDAR .....	39
Figura 27. Estrapolazione dal DPM 3D della linea .....	40
Figura 28. Sezione trasversale conduttore G(Z)TACSR .....	47
Figura 29. Sezione trasversale conduttore ZTACIR.....	48

Figura 30. Sezione trasversale conduttore ACSS/TW .....	49
Figura 31. Andamento freccia-temperatura “linea A” .....	51
Figura 32. Andamento freccia-temperatura “linea B” .....	51
Figura 33. Andamento freccia-temperatura “linea C” .....	52
Figura 34. Screenshot struttura di rete zona di Palermo .....	58
Figura 35. Screenshot su Neplan <sup>®</sup> del collegamento Sorgente-Rizziconi, con il cavo futuro non in servizio .....	62
Figura 36. Screenshot su Neplan <sup>®</sup> del collegamento Sorgente-Rizziconi, con il cavo futuro in servizio .....	63
Figura 37. Relazione tra freccia e temperatura .....	69
Figura 38. Rete elettrica siciliana a 220kV e 380kV nel 2020 .....	77
Figura 39. Valore percentuale di tensione rispetto al valore nominale per ogni nodo del sistema elettrico nei tre scenari al 2020 .....	82
Figura 40. Schematizzazione di una linea di trasmissione per determinare i fasori delle componenti spaziali per il calcolo del campo magnetico. ....	85
Figura 41. Schema della linea aerea a 150kV considerata .....	89
Figura 42. Densità del flusso magnetico (RMS) sul terreno, con e senza tecniche di mitigazione, per il caso A .....	90
Figura 43. Densità del flusso magnetico (RMS) sul terreno, con e senza tecniche di mitigazione, per il caso B .....	91
Figura 44. Densità del flusso magnetico (RMS) sul terreno, con e senza tecniche di mitigazione, per il caso C .....	91
Figura 45. Configurazione standard dei cavi .....	96
Figura 46. Geometria della schermatura e posizionamento per il caso SCS .....	97
Figura 47. Linea split-phase per i casi SP e SPS; geometria della schermatura e posizionamento per il caso SCS.....	97
Figura 48. Andamento del campo magnetico sul terreno per il caso A in condizioni standard (SC), con sola schermatura (SCS).....	98
Figura 49. Andamento del campo magnetico sul terreno per il caso B in condizioni standard (SC), con sola schermatura (SCS), in split-phase (SP), e con schermatura e split-phase (SPS).....	98

Figura 50. Andamento del campo magnetico sul terreno per il caso C in condizioni standard (SC), con sola schermatura (SCS), in split-phase (SP), e con schermatura e split-phase (SPS).....	99
Figura 51. Profilo laterale del campo elettrico a terra .....	101
Figura 52. Distribuzione verticale del campo elettrico.....	101

## Indice delle tabelle

---

Tabella 1. Riepilogo UP allacciate alla rete AT .....	16
Tabella 2. Caratteristiche tecniche Sorgente – Rizziconi I.....	19
Tabella 3. Caratteristiche elettriche Sorgente – Rizziconi I .....	20
Tabella 4. Caratteristiche tecniche Sorgente – Rizziconi II.....	23
Tabella 5. Caratteristiche elettriche Sorgente – Rizziconi II.....	23
Tabella 6. Caratteristiche climatiche Linea A .....	42
Tabella 7. Massima corrente che può transitare nella linea A in inverno.....	43
Tabella 8. Massima corrente che può transitare nella linea A in estate.....	43
Tabella 9. Caratteristiche climatiche Linea B.....	43
Tabella 10. Massima corrente che può transitare nella linea B in inverno.....	43
Tabella 11. Massima corrente che può transitare nella linea B in estate.....	44
Tabella 12. Massima corrente che può transitare nella linea C in inverno.....	44
Tabella 13. Massima corrente che può transitare nella linea C in estate.....	44
Tabella 14. Riepilogo delle correnti ottenute.....	44
Tabella 15. Incrementi percentuali consentiti.....	45
Tabella 16. Parametri dei conduttori HTLS.....	50
Tabella 17. Confronto freccia-temperatura conduttori .....	52
Tabella 18. Caratteristiche climatiche delle linee oggetto di studio.....	53
Tabella 19. Massima corrente che può transitare nella linea A con conduttori HTLS .....	54
Tabella 20. Massima corrente che può transitare nella linea B con conduttori HTLS .....	54
Tabella 21. Massima corrente che può transitare nella linea C con conduttori HTLS .....	55
Tabella 22. Caratteristiche delle linee rete modello .....	59
Tabella 23. Caratteristiche conduttori delle linee aeree.....	59
Tabella 24. Macchine sincrone allacciate alla rete AT siciliana.....	60
Tabella 25. Export con continente e nuovo collegamento in servizio .....	64
Tabella 26. $P_{conv}=P_{carichi}+Perdite$ e $Export=1000MW$ .....	65

Tabella 27. $P_{conv}=P_{carichi}+P_{perdite}$ e $Export=1600MW$ .....	66
Tabella 28. Export con continente e linea 380kV Sorgente-Paternò aperta .....	67
Tabella 29. Potenza attiva generata, assorbita ed esportata in configurazioni invernali ed estive standard.....	68
Tabella 30. Confronto freccia-temperatura tra conduttori tradizionali ed HTLS .....	70
Tabella 31. Condizioni climatiche Sud Sicilia.....	70
Tabella 32. Condizioni climatiche Est Sicilia.....	71
Tabella 33. Condizioni climatiche Nord-Est Sicilia .....	71
Tabella 34. Condizioni climatiche Nord-Ovest Sicilia.....	71
Tabella 35. Massima corrente che può transitare nel Sud della Sicilia con i conduttori HTLS .....	72
Tabella 36. Massima corrente che può transitare nell' Est della Sicilia con i conduttori HTLS.....	72
Tabella 37. Massima corrente che può transitare nel Nord-Est della Sicilia con i conduttori HTLS.....	72
Tabella 38. Massima corrente che può transitare nel Nord-Ovest della Sicilia con i conduttori HTLS.....	72
Tabella 39. Massimo export di potenza attiva verso il continente.....	73
Tabella 40. Configurazione standard di potenza generata, assorbita, esportata nel 2015 .....	76
Tabella 41. Interconnessioni con la Sicilia al 2020 .....	78
Tabella 42. Condizioni di lavoro, di generazione e carico, per le simulazioni proposte al 2020.....	79
Tabella 43. Risultati delle simulazioni .....	81
Tabella 44. Incremento percentuale di potenza attiva verso il Continente al 2020 rispetto al 2015.....	81
Tabella 45. Valore percentuale della tensione ai nodi che presentano violazioni rispetto al valore nominale per ogni scenario .....	82
Tabella 46. Riferimenti geometrici per la linea di Figura 41.....	89
Tabella 47. Riduzione del campo magnetico linea aerea.....	92
Tabella 48. Riduzione del campo magnetico linea in cavo .....	99
Tabella 49. Configurazione campata più bassa linea Sorgente – Rizziconi I.....	100

# Lista Acronimi

---

ACSR	-	Aluminum Conductor Steel reinforced
AT	-	Alta tensione
BEM	-	Boundary Element Method
DTR	-	Dynamic Thermal Rating
ELF	-	Extra Low Frequency
FEM	-	Finite Element Method
FER	-	Fonti Energetiche Rinnovabili
FRNP	-	Fonti Rinnovabili Non Programmabili
GD	-	Generazione Distribuita
GIS	-	Gas System Insulated
HTLS	-	High Temperature Low Sag
HVAC	-	High Voltage Alternating Current
HVDC	-	High Voltage Direct Current
LIDAR	-	Laser Imaging Detection and Ranging
MSP	-	Mediterranean Solar Plan
RES	-	Renewable Energy Source
RMS	-	Root Mean Square
SACOI	-	Sardegna-Corsica-Italia
TSO	-	Transmission System Operator
UP	-	Unità Produttive

# Abstract

---

La sempre maggior produzione di energia elettrica da FRNP in Sicilia, ed i nuovi sviluppi da qui a qualche anno sulla rete elettrica siciliana, stimolano ad effettuare degli studi su come il sistema elettrico dell'isola possa evolversi nei prossimi anni.

Anche i nuovi collegamenti e le nuove interconnessioni, attualmente solo in fase di scheduling/progettazione, che si apprestano ad essere realizzati nell'area mediterranea, incoraggiano ad effettuare delle analisi su come il sistema elettrico isolano possa farsi trovare pronto a supportare le grosse iniezioni di potenza che in futuro investiranno la regione.

Questo lavoro di tesi dopo aver analizzato lo stato della rete AT siciliana, sia nelle condizioni attuali, che in quelle future, definisce quali sono le maggiori criticità presenti nell'isola, e mostra come, attraverso l'applicazione di nuove tecnologie, sarebbe possibile incrementare la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

In quest'ottica si inserisce anche il nuovo collegamento con la penisola italiana che entrerà in funzione a breve, denominato "Sorgente-Rizziconi II". Questo, tra le altre cose, non solo consentirà una maggiore stabilità del sistema elettrico siciliano rendendolo maggiormente indipendente dalle fonti convenzionali, ma, soprattutto, garantirà l'aumento di export da produzione rinnovabile, e migliorerà l'affidabilità e la qualità del servizio elettrico in tutta l'area.

Inoltre, vista la posizione strategica dell'isola nel mediterraneo, ed in considerazione delle future interconnessioni con Malta ed il Nord Africa che investiranno da qui a breve la regione, studi sono stati effettuati per valutare i possibili benefici che ne deriveranno, e le eventuali criticità.

In conclusione, al fine di garantire che gli eventuali futuri incrementi di potenza sulle reti non comportino effetti negativi sulla popolazione e sull'ambiente circostante, studi di carattere elettromagnetico sono stati effettuati. Le analisi svolte per linee aeree ed in cavo hanno riguardato anche l'applicazione di tecniche di mitigazione presenti sia in letteratura che nella pratica.



# 1 Introduzione

---

## 1.1 Contesto

Lo sviluppo molto forte delle ricerche e delle tecnologie concernenti le fonti energetiche rinnovabili, in particolar modo le fonti eoliche e quelle fotovoltaiche, ha caratterizzato l'evoluzione del parco di produzione di energia elettrica nell'ultimo decennio, sia in Italia che in Europa.

Tale espansione ha completamente rivoluzionato il modo di studiare e gestire le reti di potenza, sia quelle di distribuzione che quelle di trasmissione.

Il carattere fortemente distribuito di tali fonti d'energia, porta spesso a definire la presenza di tali impianti di produzione appunto come generazione distribuita.

L'immissione sulla rete di potenza ora quindi non avviene più in una zona geograficamente localizzata, ma avviene il più delle volte in zone della rete con potenze di entità fondamentalmente incognita a causa della natura aleatoria delle fonti di energia rinnovabili, non a caso definite anche non programmabili.

L'incremento della produzione di energia elettrica dalle FER, il miglioramento della qualità del servizio elettrico e la stabilità della rete elettrica siciliana rappresentano degli obiettivi fondamentali che i principali attori dei servizi energetici in Italia debbono porsi.

L'isola ancora oggi riscontra problematiche legate alla vetustà degli impianti, e ad una scarsa magliatura della rete elettrica a 380kV. Inoltre, l'unico collegamento presente con il continente, che sta per essere triplicato, ha reso sempre la Sicilia fortemente dipendente dalle fonti convenzionali, ed ha comportato dei prezzi dell'energia elettrica mediamente superiori anche del 30% rispetto alle altre regioni italiane.

Obiettivo di questa tesi è determinare le maggiori criticità che l'isola presenta e che bloccano la produzione di energia elettrica da FER. Inoltre, un focus sul futuro collegamento tra la Sicilia e la penisola italiana verrà riportato ed analizzato. Analisi di Power Flow e tecniche innovative per l'incremento della portata in corrente degli elettrodotti e delle potenze sulle linee sono stati studiati ed applicati al sistema elettrico siciliano.

Nell'ottica delle interconnessioni che da qui a breve si affacceranno nel mediterraneo sono stati effettuati, infine, degli studi per determinare come la Sicilia possa ritrovarsi come grande crocevia del mediterraneo per il transito delle potenze verso la direttrice che collega il Sud dell'Europa ai paesi del Nord.

## **1.2 Linee di ricerca ed articolazione capitoli**

Le attività di ricerca analizzate e riportate nel presente lavoro di tesi hanno riguardato le seguenti linee:

1. rilevazioni delle criticità attualmente presenti sulla rete di trasmissione siciliana e possibile incremento della potenza prodotta da FRNP nell'isola attraverso l'uso di tecnologie innovative;
2. studio delle interconnessioni presenti e future con Malta ed il nord Africa ed analisi dei benefici e delle criticità derivanti dal nuovo collegamento con la penisola italiana;
3. studi sugli effetti dei campi magnetici prodotti da linee aeree ed in cavo in alta tensione e tecniche di mitigazione.

Per la prima linea di ricerca sono state effettuate delle analisi statiche sull'attuale rete in alta tensione siciliana. Sono state evidenziate le principali problematiche che non consentono un corretto ed ottimo esercizio del sistema elettrico nell'isola. Sono state realizzate e riportate analisi in ambiente Neplan<sup>®</sup>, su come l'utilizzo di conduttori HTLS per linee a 150kV possa garantire un incremento di export di potenza attiva verso il continente.

Per la seconda linea di ricerca, in confronto con il gestore della rete elettrica di trasmissione nazionale (Terna S.p.A.), sono state effettuate delle simulazioni sperimentali considerando la rete elettrica mediterranea al 2020 confrontandola con l'attuale rete elettrica siciliana. Gli studi forniscono primi rilevanti risultati sul possibile futuro export dal nord Africa verso il continente europeo, recependo quelle che sono le intenzioni degli organi di governo dei TSO europei.

Infine, in considerazione delle precedenti linee di ricerca, sono state condotte analisi teoriche sui campi magnetici prodotti da linee aeree a 150kV e da linee in cavo a 380kV. Questo, allo scopo di prevenire possibili effetti, causati dagli

elettrodotti, sulla salute umana e sull'ambiente circostante. Tecniche di mitigazione presenti in letteratura sono state implementate ed applicate. Questi studi, svolti in ambiente LabVIEW, forniscono importanti risultati sulle azioni da intraprendere per ridurre l'esposizione ai campi magnetici.

Il seguente lavoro di tesi è stato articolato in 7 capitoli, compreso il presente.

Il *capitolo 2* effettua un'analisi tecnica sull'attuale rete AT in Sicilia. Dopo la descrizione della rete di trasmissione e trasporto presente nell'isola, vengono riportati i conduttori utilizzati sulle linee AT. Focus su fabbisogno e centri di produzione nell'isola sono stati effettuati. Infine, vengono mostrate le principali caratteristiche dell'attuale collegamento con il continente.

Il *capitolo 3* descrive il futuro collegamento con il continente Sorgente-Rizziconi II. Riporta una breve descrizione delle opere che sono state realizzate, mostrando infine qualche foto sulle particolari lavorazioni innovative adottate per la realizzazione del nuovo elettrodotto.

Il *capitolo 4* mostra alcune tecniche per l'incremento della produzione da FER in Sicilia. Dopo la descrizione di sistemi *real-time* ed *off-line* vengono riportate alcune applicazioni effettuate sulla rete AT siciliana. Nuove tecnologie di georeferenziazione associate all'applicazione di conduttori HTLS, portano ad importanti risultati.

Il *capitolo 5* realizza delle analisi di Power Flow sulla rete AT in Sicilia. A valle della descrizione della rete modello AT siciliana implementata su Neplan<sup>®</sup>, vengono riportati alcuni scenari simulati al fine di incrementare la produzione di FER nell'isola. Inoltre, sono state effettuate delle simulazioni imponendo sul software i parametri dei conduttori HTLS per l'incremento di export verso il continente.

Il *capitolo 6* mostra come evolverà la rete elettrica siciliana da qui a qualche anno, studiando attraverso delle simulazioni in ambiente Neplan<sup>®</sup>, dei possibili scenari di export verso il continente, che potrebbero rendere l'isola collettore di tutta la potenza che dal nord Africa si indirizza verso il nord Europa.

Il *capitolo 7* effettua delle valutazioni sui campi magnetici prodotti da linee AT aeree ed in cavo. Vengono riportate delle tecniche di mitigazione dei campi magnetici attualmente presenti in letteratura, e vengono effettuate delle applicazioni

teoriche su delle linee AT. Questi studi forniscono interessanti risultati sulle azioni da intraprendere per ridurre l'esposizione ai campi magnetici.

Infine si riportano le conclusioni e si prospettano gli sviluppi futuri della ricerca.

## 2 Analisi tecnica sull'attuale rete AT in Sicilia

---

In questo capitolo viene riportata e studiata la rete elettrica siciliana in alta tensione. A seguito della descrizione delle peculiarità principali della rete, vengono riportate le caratteristiche dei centri di produzione presenti nell'isola, viene analizzato il fabbisogno registrato negli ultimi anni, e si presenta l'attuale collegamento con il continente.

Tutti questi dati saranno fondamentali nei prossimi capitoli per la realizzazione delle simulazioni, e per effettuare gli studi di Power Flow sulla rete.

### 2.1 Rete AT siciliana

La rete elettrica in AT siciliana è costituita da una dorsale a 380kV, proveniente dal continente, che collega Sorgente (ME) con Priolo (SR); un anello a 220kV, che si estende per tutta la Sicilia, toccando diverse province siciliane, ed infine vi sono diverse ramificazioni a 150kV che consentono la completa elettrificazione dell'isola.

Nello specifico le linee elettriche a 380kV presenti sul territorio siciliano sono cinque, per complessivi 252km:

1. Sorgente – Rizziconi, lunga nel tratto siciliano 36km
2. Sorgente (ME) – Paternò (CT), lunga 98km
3. Paternò(CT) – Chiaramonte Gulfi (SR), lunga 57km
4. Priolo - Chiaramonte Gulfi (SR), lunga 60km
5. Priolo – Centrale Isab, lunga 1km

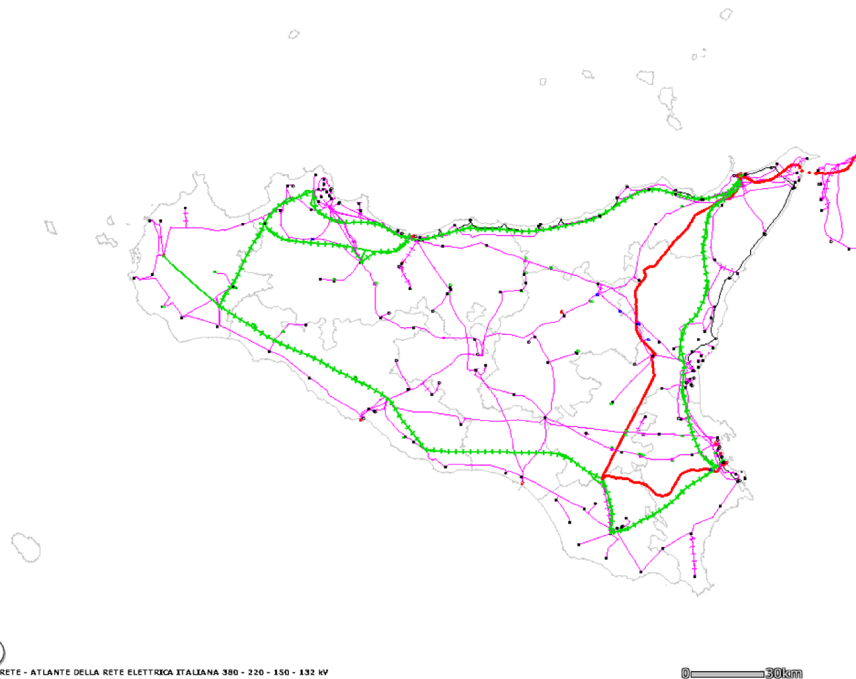
Le linee a 220kV sono quaranta, e costituiscono l'asse portante della rete di trasporto AT, consentendo grazie all'anello, la completa elettrificazione dell'isola, trasportando la potenza che proviene dalla rete a 380kV e garantendo l'approvvigionamento delle reti a 150kV. Complessivamente la rete 220kV si sviluppa in Sicilia per 925km toccando tutte le province siciliane [1].

Le linee a 150kV, ben distribuite su tutto il territorio siciliano, sono 128 e si estendono per complessivi 1900km circa. Con una fitta ramificazione e magliatura, garantiscono l'alimentazione ad alcuni utenti AT, ed attraverso le cabine primarie

prima, e le cabine secondarie dopo, consentono l'alimentazione di tutti i carichi MT e bt.

Le linee aeree presentano conduttori del tipo ACSR, con diametri differenti in funzione della tensione di esercizio e della posizione della linea rispetto ai centri di produzione. I sostegni sono nel 98% dei casi del tipo a traliccio, i restanti sono realizzati in tubolare. Negli ultimi anni si va sviluppando nell'isola l'utilizzo di isolatori in composito, costruiti con materiali polimerici, che presentano migliori caratteristiche dielettriche, ma con un peso inferiore agli attuali isolatori utilizzati.

In Figura 1 si riporta la rete elettrica siciliana al 2015.



## LEGENDA DELLA RETE

ELETTRODOTTI		RTN	Non RTN
Linea aerea 380 kV			
Linea aerea doppia terna 380 kV			
Linea in cavo 380 kV			
Linea in cavo 400 kV cc			
Linea aerea 220 kV			
Linea aerea doppia terna 220 kV			
Linea in cavo 220 kV			
Linea aerea 200 kV cc			
Linea in cavo 200 kV cc			
Linea aerea 150 kV			
Linea aerea doppia terna 150 kV			
Linea in cavo 150 kV			
Linea aerea 132 kV			
Linea aerea doppia terna 132 kV			
Linea in cavo 132 kV			

STAZIONI			
Stazione 380 kV RTN		Stazione 132 kV RTN	
Stazione 220 kV RTN		Stazione non RTN e Cabina Primaria	
Stazione 150 kV RTN		Cabina Utente	

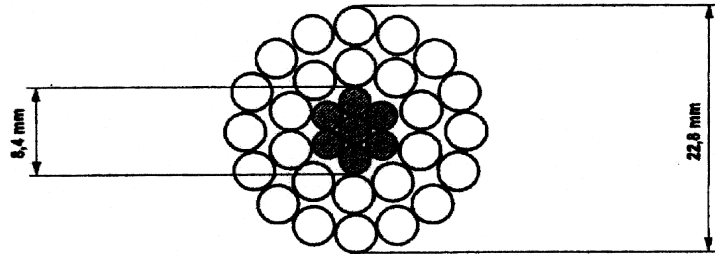
CENTRALI			
Centrale Idroelettrica		Centrale Termoelettrica	
Centrale Eolica		Centrale Geotermoelettrica	

Figura 1. Rete elettrica in alta tensione siciliana e legenda

## 2.2 Conduttori aerei utilizzati sulle linee AT in Sicilia

I conduttori aerei utilizzati sulle linee AT siciliane sono del tipo ACSR, e variano in diametro. Generalmente, per le linee a 150kV si utilizzano dei conduttori con diametro da 22.8mm, mentre per le linee a 220kV e 380kV si utilizzano dei conduttori da 31.5mm. Nell'ultimo caso, questi sono utilizzati in fascio trinato.

Per linee 150kV di nuova costruzione, o in prossimità di grossi centri di produzione, vengono utilizzati conduttori ACSR da 31.5mm.



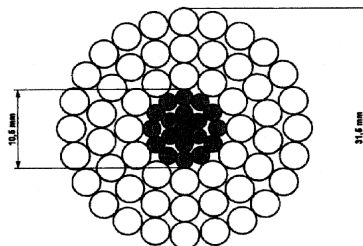
TIPO CONDUTTORE	C 1/1		C 1/2 (*)
	NORMALE		INGRASSATO
FORMAZIONE	Alluminio	26 x 3,60	26 x 3,60
	Acciaio	7 x 2,80	7 x 2,80
SEZIONI TEORICHE (mm <sup>2</sup> )	Alluminio	264,6	264,6
	Acciaio	43,1	43,1
	Totale	307,70	307,70
TIPO DI ZINCATURA DELL'ACCIAIO	Normale	Maggiorata	
MASSA TEORICA (Kg/m)	1,068		1,121(**)
RESISTENZA ELETTR. TEORICA A 20°C (ohm/km)	0,109		0,109
CARICO DI ROTTURA (daN)	9752		9532
MODULO ELASTICO FINALE (N/mm <sup>2</sup> )	77000		77000
COEFFICIENTE DI DILATAZIONE (1/°C)	18,9 x 10 <sup>-6</sup>		18,9 x 10 <sup>-6</sup>

(\*) Per zone ad alto inquinamento salino

(\*\*) Compresa massa grasso pari a 45,87 gr/m.

Figura 2. Caratteristiche conduttore ACSR 22.8mm

Fonte: Terna S.p.A.



TIPO CONDUTTORE	C 2/1		C 2/2 (*)
	NORMALE		INGRASSATO
FORMAZIONE	Alluminio	54 x 3,50	54 x 3,50
	Acciaio	19 x 2,10	19 x 2,10
SEZIONI TEORICHE (mm <sup>2</sup> )	Alluminio	519,5	519,5
	Acciaio	65,80	65,80
	Totale	585,30	585,30
TIPO DI ZINCATURA DELL'ACCIAIO	Normale	Maggiorata	
MASSA TEORICA (Kg/m)	1,953		2,071(**)
RESISTENZA ELETTR. TEORICA A 20°C (ohm/km)	0,05564		0,05564
CARICO DI ROTTURA (daN)	16852		16516
MODULO ELASTICO FINALE (N/mm <sup>2</sup> )	68000		68000
COEFFICIENTE DI DILATAZIONE (1/°C)	19,4 x 10 <sup>-6</sup>		19,4 x 10 <sup>-6</sup>

(\*) Per zone ad alto inquinamento salino

(\*\*) Compresa massa grasso pari a 103,39 gr/m.

Figura 3. Caratteristiche conduttore ACSR 31.5mm

Fonte: Terna S.p.A.



Figura 2 e Figura 3 mostrano le caratteristiche tecniche dei conduttori attualmente utilizzati sulle linee AT siciliane.

Nei prossimi capitoli verranno effettuati diversi studi di *reconductoring* con dei conduttori termoresistenti e verranno simulati diversi scenari.

### 2.3 La produzione di energia elettrica nell'isola

La produzione di energia elettrica negli ultimi anni, anche grazie all'avvento delle fonti energetiche rinnovabili, ha avuto una crescita esponenziale nell'isola. In Tabella 1 si riporta un riepilogo della potenza generata sull'isola dalle unità produttive allacciate alle reti AT. Figura 4 e Figura 5 descrivono, in percentuale, le fonti primarie che vengono utilizzate per la produzione di energia elettrica.

Tipologia	Totale Potenza installata [MW]
Termoelettrica	6500 circa
FER	2500 circa
Totale	9000 circa

Tabella 1. Riepilogo UP allacciate alla rete AT

Fonte: Terna S.p.A.

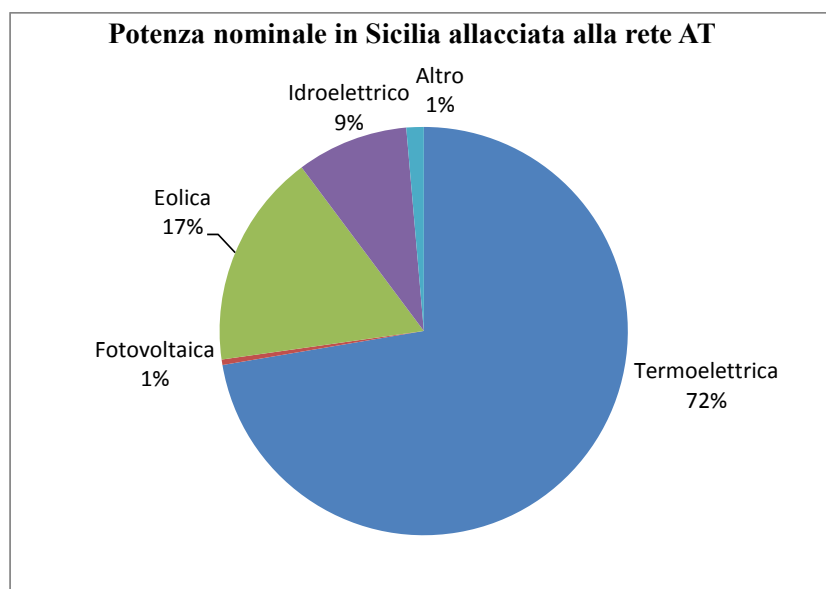


Figura 4. Potenza nominale installata in Sicilia collegata alla rete AT

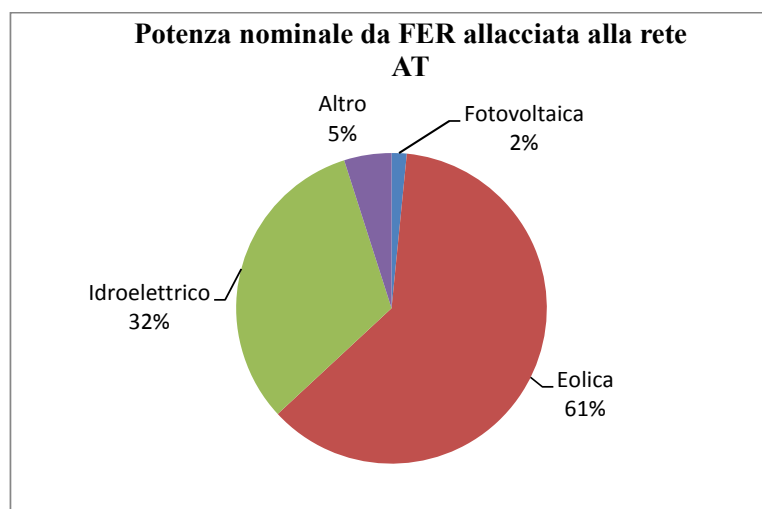


Figura 5. Potenza nominale prodotta da FER allacciata alla rete AT

## 2.4 Fabbisogno mensile nell'isola negli ultimi anni

Il fabbisogno di potenza nell'isola, anche a causa della crisi economica che ha investito l'Italia, negli ultimi anni è andando man mano diminuendo.

Figura 6, Figura 7 e Figura 8 mostrano come negli ultimi anni il fabbisogno sia sceso di oltre il 10%, con picchi anche del 18% nei mesi invernali.

Mentre nel 2010 il valore di fabbisogno massimo di potenza si attestava a circa 2600MW, ed il valore minimo a 2000MW, nel 2015 il valore di fabbisogno massimo di potenza vale circa 2400MW, mentre il valore minimo circa 1800MW.

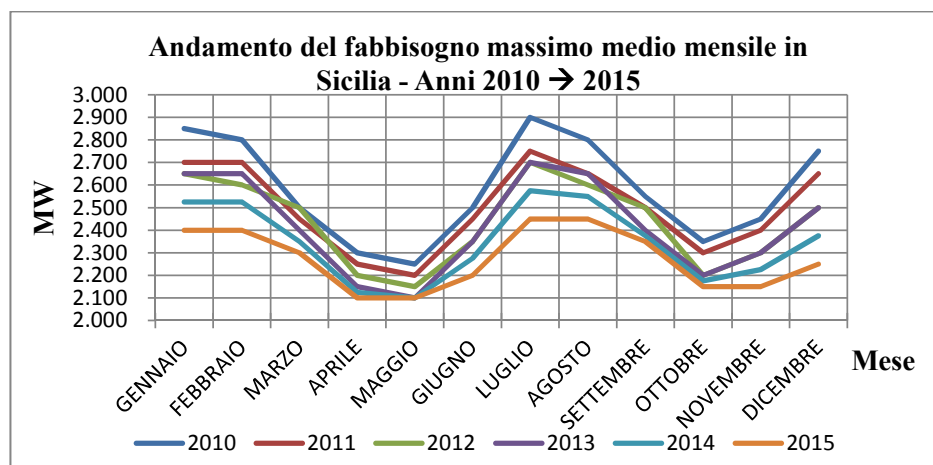


Figura 6. Fabbisogno massimo medio mensile anni 2010 → 2015

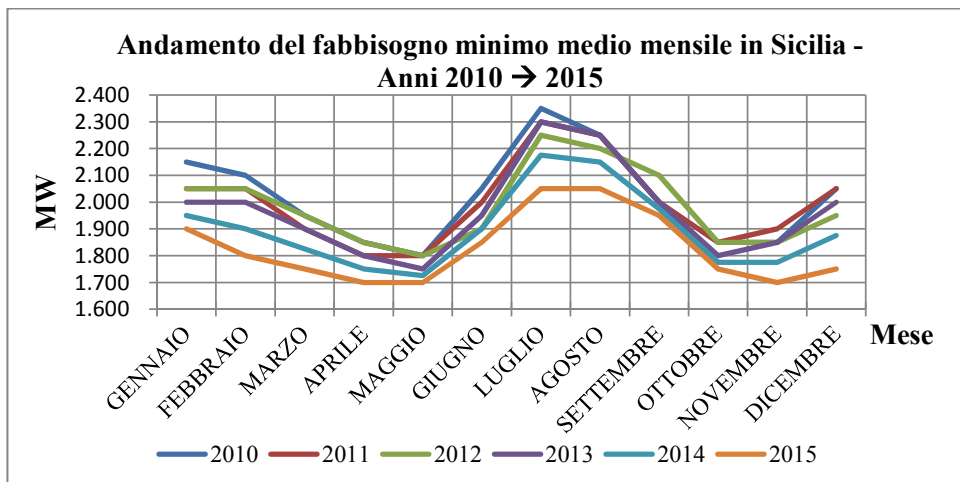


Figura 7. Fabbisogno minimo medio mensile anni 2010 → 2015

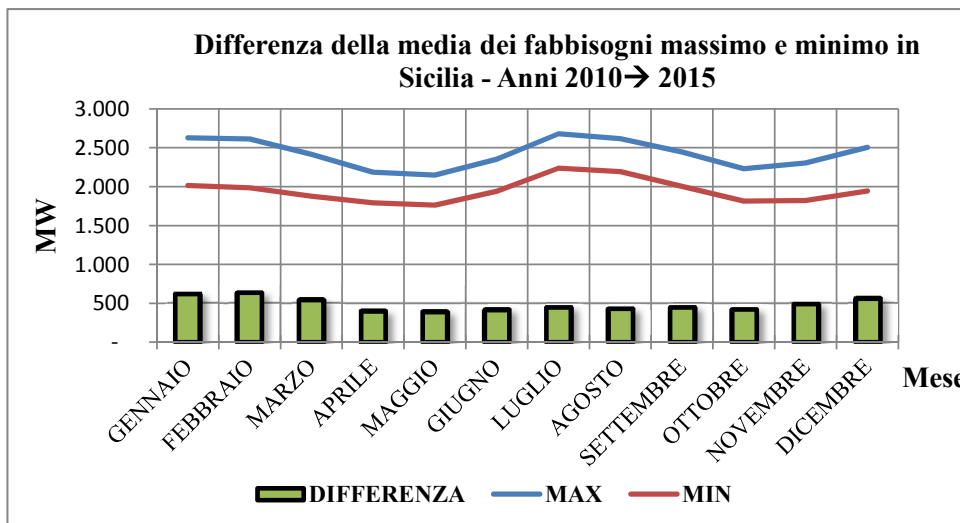


Figura 8. Differenza dei fabbisogni medi

## 2.5 L'attuale Sorgente-Rizziconi I

L'attuale collegamento a 380kV "Sorgente – Rizziconi I" ha una lunghezza complessiva di 80.1km di cui 71.1km in tratto aereo.

I tratti di linea aerea sono costituiti da conduttori trinati in materiale Alluminio-Acciaio (ACSR) con diametro di 31.5mm ( $3 \times 585.35 \text{mm}^2$ ) con isolamento antisale nelle zone esposte in prossimità del mare; per quanto riguarda l'attraversamento dello stretto di Messina, lo stesso è realizzato con quattro cavi in olio fluido (OF) di

cui la parte terrestre lunga circa 3km ha sezione pari a 2100mm<sup>2</sup> e la parte sottomarina lunga 6.5km ha sezione pari a 1600mm<sup>2</sup> in rame.

In Figura 9 si riporta lo schema unifilare dell'attuale collegamento. Tabella 2 e Tabella 3 riportano le caratteristiche tecniche ed elettriche del Sorgente-Rizziconi attuale, ed infine, in Figura 10, si riporta una sezione del cavo terrestre.

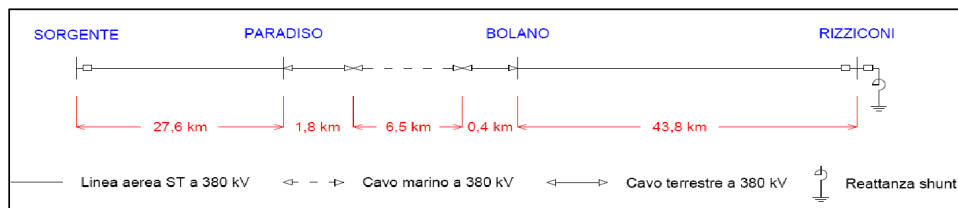


Figura 9. Schema unifilare Sorgente-Rizziconi I

Fonte: Terna S.p.A.

<b>CARATTERISTICHE TECNICHE SORGENTE – RIZZICONI I</b>		
<b>Tensione Nominale</b>		380kV
<b>Lunghezza del collegamento</b>		80.1km
<b>Linea Aerea</b>	Lunghezza	71.1km
	Tipologia	Singola terna trinata 3x31,5mm
<b>Cavo Marino</b>	Lunghezza	6.5km
	Isolamento	Carta impregnata in olio fluido
	Sezione	1600mm <sup>2</sup> in rame
<b>Cavo Terrestre</b>	Lunghezza	3.1km
	Isolamento	Carta impregnata in olio fluido
	Sezione	2100mm <sup>2</sup> in rame

Tabella 2. Caratteristiche tecniche Sorgente – Rizziconi I

Fonte: Terna S.p.A.

<b>CARATTERISTICHE ELETTRICHE SORGENTE – RIZZICONI I</b>		
<b>Linea Aerea</b>	Resistenza alla sequenza diretta a 90°C	0.0239Ω/km
	Reattanza alla sequenza diretta	0.27Ω/km
	Capacità alla sequenza diretta	13,4nF/km
<b>Cavo Marino</b>	Resistenza alla sequenza diretta a 90°C	0.028Ω/km
	Reattanza alla sequenza diretta	0.068Ω/km
	Capacità alla sequenza diretta	0.34μF/km
<b>Cavo Terrestre</b>	Resistenza alla sequenza diretta a 90°C	0.012Ω/km
	Reattanza alla sequenza diretta	0.22Ω/km
	Capacità alla sequenza diretta	0.4μF/km
<b>Reattanza complessiva dell'elettrodotto alla sequenza diretta</b>		<b>20.2Ω</b>

Tabella 3. Caratteristiche elettriche Sorgente – Rizziconi I

Fonte: Terna S.p.A.



Figura 10. Sezione di cavo terrestre Sorgente-Rizziconi I

Il cavo sottomarino è del tipo a conci. Ha una portata massima ammissibile pari a 1890A, a cui corrisponde una massima potenza attiva trasmissibile pari a 1270MW. Tuttavia, per evitare che il cavo, e quindi il collegamento, lavori al limite termico, la potenza massima sul cavo non supera mai i 1000MW, sia in import, che in export.

Ogni cavo sottomarino forma, insieme con le relative tratte terrestri, un unico circuito in olio, alimentato agli estremi da stazioni di pompaggio. Le stazioni, completamente automatiche, provvedono a mantenere i cavi in pressione compensando gli effetti termici. L'olio contenuto nei serbatoi è mantenuto costantemente sottovuoto da apposite pompe. Infine un gioco di valvole consente di gestire il collegamento anche con una delle due stazioni (lato siculo, o lato calabro) fuori servizio.

## 3 Il futuro Sorgente-Rizziconi II

In questo capitolo viene riportata una descrizione del futuro collegamento Sorgente-Rizziconi II.

L'opera, che assume carattere strategico per gli interessi energetici dell'Italia è quasi in fase di completamento.

A valle della descrizione tecnica delle opere, e delle principali peculiarità delle future stazioni elettriche e delle linee, uno stato di avanzamento lavori a fine 2015 viene riportato, e vengono proposte alcune particolari foto sulle lavorazioni effettuate.

### 3.1 Descrizione di massima dell'opera

Il nuovo elettrodotto a 380kV in doppia terna, che si aggiunge all'unico collegamento attualmente esistente tra Sicilia e Calabria, costituito parte in linea aerea, parte in cavo sottomarino e parte in cavo terrestre, congiungerà l'esistente stazione elettrica di Sorgente, ubicata nel territorio del Comune di San Filippo del Mela (ME), con l'esistente stazione elettrica di Rizziconi (RC).

Di seguito si riportano in Figura 11 gli schemi unifilari del vecchio collegamento (attualmente in esercizio), e del nuovo collegamento (attualmente cantierizzato). Quest'ultimo è lungo 104.3km, di questi, 38km sono in cavo marino (quello attuale è di 6.5km), 5km di cavo terrestre, il resto del collegamento è in linea aerea 380kV doppia terna trinata con conduttori aventi diametro di 31.5mm [2].

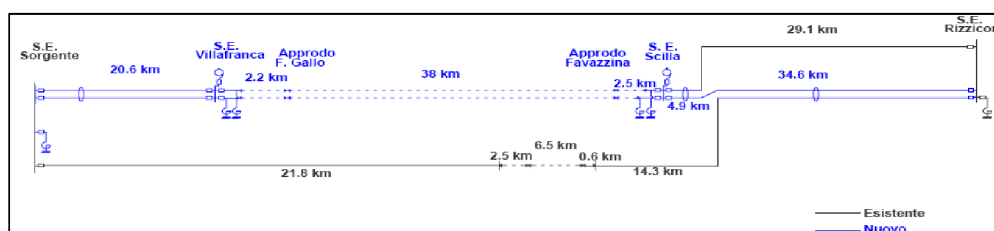


Figura 11. Schema unifilare Sorgente-Rizziconi II

Fonte: Terna S.p.A.

Si riportano di seguito in Tabella 4 e Tabella 5 le principali caratteristiche del futuro collegamento tra la stazione di Rizziconi in Calabria e la stazione di Sorgente in Sicilia.

<b>CARATTERISTICHE TECNICHE SORGENTE – RIZZICONI II</b>		
<b>Tensione Nominale</b>		380kV
<b>Lunghezza del collegamento</b>		104.3km
<b>Linea Aerea</b>	Lunghezza	61km
	Tipologia	Doppia terna trinata 3x31.5mm
<b>Cavo Marino</b>	Lunghezza	38km
	Isolamento	Carta + olio fluido
	Sezione	1500mm <sup>2</sup> in rame
<b>Cavo Terrestre</b>	Lunghezza	5km
	Isolamento	XLPE
	Sezione	2500mm <sup>2</sup> in rame

Tabella 4. Caratteristiche tecniche Sorgente – Rizziconi II

Fonte: Terna S.p.A.

<b>CARATTERISTICHE ELETTRICHE SORGENTE – RIZZICONI II</b>		
<b>Linea Aerea</b>	Resistenza alla sequenza diretta a 90°C	0.0239Ω/km
	Reattanza alla sequenza diretta	0.28Ω/km
	Capacità alla sequenza diretta	13nF/km
<b>Cavo Marino</b>	Resistenza alla sequenza diretta a 90°C	0.026Ω/km
	Reattanza alla sequenza diretta	0.075Ω/km
	Capacità alla sequenza diretta	0.24 – 0.26μF/km
<b>Cavo Terrestre</b>	Resistenza alla sequenza diretta a 90°C	Olio Fluido: 0.012Ω/km XLPE: 0.013Ω/km
	Reattanza alla sequenza diretta	Olio Fluido: 0.18Ω/km XLPE: 0.18Ω/km
	Capacità alla sequenza diretta	Olio Fluido: 0.31μF/km XLPE: 0.24μF/km
<b>Reattanza complessiva dell'elettrodotto alla sequenza diretta</b>		19.1Ω

Tabella 5. Caratteristiche elettriche Sorgente – Rizziconi II

Fonte: Terna S.p.A.



### 3.2 Descrizione tecnica delle opere e stato di avanzamento dei lavori

Le opere, che nel complesso sono al 95% delle lavorazioni, hanno riguardato per il versante siculo [3]:

- ampliamento della stazione elettrica di Sorgente;
- collegamento in linea aerea a 380kV doppia terna Sorgente – Villafranca Tirrena;
- realizzazione della stazione di trasformazione 380/150kV di Villafranca Tirrena.

Per il versante calabro:

- ampliamento della stazione elettrica di Scilla (nuova sezione 380kV);
- collegamento in linea aerea a 380kV doppia terna Scilla – Rizziconi.

Infine il collegamento tra le due regioni avviene in cavo doppia terna tra Villafranca Tirrena e Scilla (2km lato Sicilia + 38km cavo marino + 3km lato Calabria in galleria dedicata). Figura 12 e Figura 13 riportano la descrizione tecnica dell'opera, ed un inquadramento territoriale del collegamento.

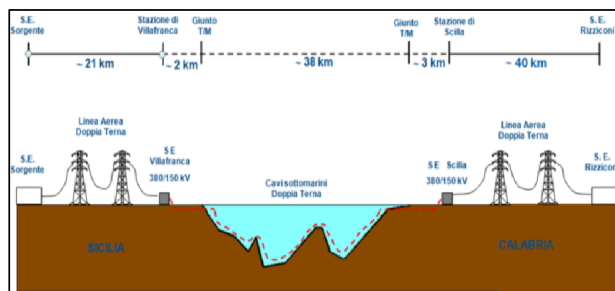


Figura 12. Descrizione tecnica dell'opera

Fonte: Terna S.p.A.



Figura 13. Inquadramento geografico dell'opera

Fonte: Terna S.p.A.

### 3.2.1 Opere nel versante siciliano

Per la realizzazione della nuova stazione elettrica di Sorgente sono stati effettuati i seguenti lavori:

- realizzazione di una nuova sezione GIS<sup>1</sup> a 380kV;
- installazione di un banco reattori da 285MVAR;
- installazione di un autotrasformatore 380/220kV da 440MVA;
- installazione delle apparecchiature atte alla messa in esercizio del nuovo collegamento.

Dopodiché, dalla stazione elettrica di Sorgente si diparte il collegamento aereo in DT, lungo circa 21km. Questo, equipaggiato con fascio trinato di conduttori ACSR da 31.5mm, attraversa tredici comuni della provincia di Messina e si atterra nella nuova stazione di Villafranca Tirrena. Qui, i lavori hanno riguardato:

- la realizzazione di sezioni GIS 380kV e 150kV;
- l'installazione di due nuovi autotrasformatori 380/150kV da 250MVA;
- l'installazione di due nuovi banchi trifase di reattori di compensazione da 285MVAR;
  - l'installazione delle apparecchiature atte alla messa in esercizio del nuovo collegamento.

Le opere nel versante siculo sono al 95% delle realizzazioni.

### 3.2.2 Collegamento in cavo 380kV DT Villafranca Tirrena – Scilla

Il collegamento tra la Sicilia e la Calabria è così costituito:

- 2km di cavo terrestre lato Sicilia;
- 38km in cavo marino tra la Sicilia e la Calabria;
- 3km di cavo terrestre lato Calabria in galleria dedicata.
- **Tratto lato Sicilia:** le due terne di cavi collegheranno i terminali cavo della stazione elettrica di Villafranca Tirrena ai giunti terra-mare, situati all'approdo di Fiumara Gallo (ME). I cavi saranno posati in cunicoli interrati lungo la Fiumara,

---

<sup>1</sup> Gas System Insulated

per una lunghezza totale di circa 2km. In Figura 14 si riporta il tracciato dei cavi lato Sicilia.



Figura 14. Tracciato cavi lato Sicilia

Fonte: Terna S.p.A.

- **Tratto marino:** le due terne di cavi collegheranno l'approdo di Fiumara Gallo con l'approdo di Favazzina, sito nel comune di Scilla (RC). I cavi, posti ad una profondità massima di 376m sono stati tutti posati. Figura 15 mostra il tracciato del cavo doppia terna marino.

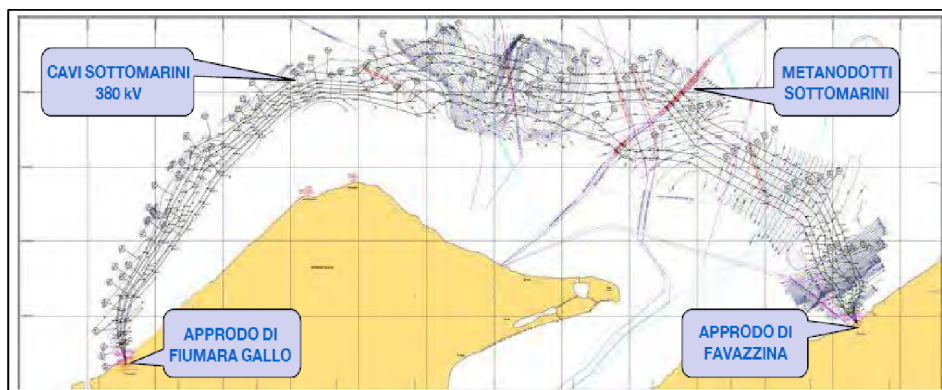


Figura 15. Tracciato in cavo doppia terna marino

Fonte: Terna S.p.A.

- **Tratto lato Calabria:** le due terne di cavi collegheranno i giunti terra-mare, situati all'approdo di Favazzina in un edificio interrato dedicato, ai terminali cavo della stazione elettrica di Scilla. Le due terne di cavi saranno posate all'interno di un cavidotto sotterraneo dedicato, appositamente realizzato, avente lunghezza complessiva di circa 3km, costituito da una galleria sub-orizzontale ed un pozzo verticale. In Figura 16 si riporta il tracciato dei cavi lato Calabria.

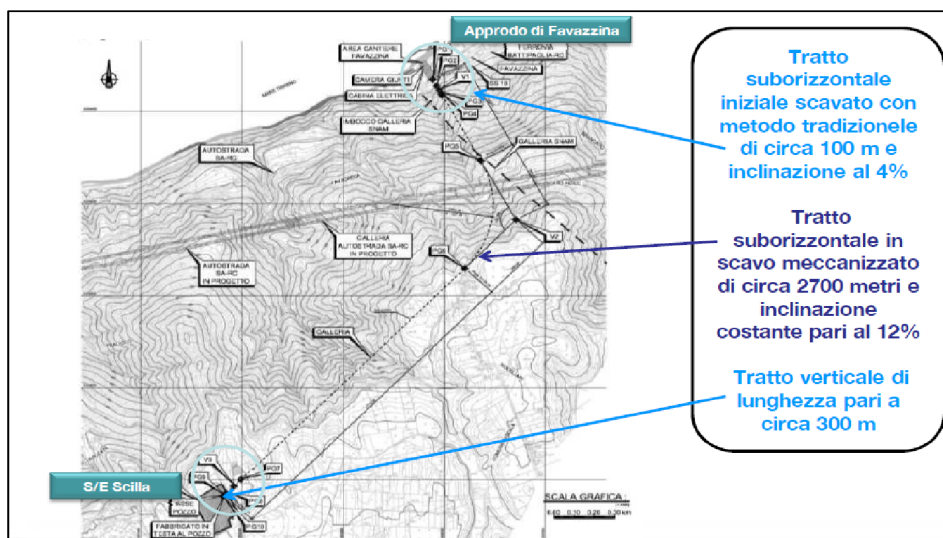


Figura 16. Tracciato cavi lato Calabria

Fonte: Terna S.p.A.

Le opere civili della galleria di Favazzina (RC) e del pozzo di Melia (RC) sono in fase di ultimazione. Il completamento delle opere è previsto nel primo trimestre del 2016.

### 3.2.3 Opere nel versante calabro

I cavi terrestri si attestano presso la stazione elettrica di Scilla (RC). Qui, si è provveduto a:

- realizzare nuova sezione GIS 380kV;
- installare due banchi di reattori trifase 380kV da 285MVAR;
- installare due autotrasformatori 380/150kV.

Il collegamento aereo, invece, lungo 40km attraversa otto comuni della provincia di Reggio Calabria. Nel versante calabro le opere sono al 95% delle lavorazioni.

In conclusione l'opera è al 95% delle lavorazioni e Terna stima che questa possa essere completata e messa in servizio entro il primo semestre del 2016.

### 3.3 Foto relative al nuovo collegamento

Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20 mostrano alcune particolari lavorazioni.



Figura 17. Panoramica dell'opera vista dal lato calabro dello stretto



Figura 18. Montaggio di un traliccio attraverso l'uso del falcone



Figura 19. Trasporto di sostegni tubolari



Figura 20. Montaggio di sostegni tubolari

## 4 Nuove tecniche per l'incremento delle FER in Sicilia

---

La sempre più crescente produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, e le difficoltà a costruire nuove linee aeree di trasmissione all'interno del territorio, inducono i TSO a sfruttare al meglio gli elettrodotti esistenti [4]-[7]. Questo capitolo mira a valorizzare quelle che sono le tecniche presenti in letteratura che consentono un incremento della portata in corrente degli elettrodotti, e quindi un possibile incremento delle FER in Sicilia.

Gli interventi per incrementare la portata in corrente di elettrodotti possono essere di due tipi:

- *real-time*;
- *off-line*.

Dopo aver analizzato entrambi i sistemi, alcune applicazioni in off-line verranno riportate, in quanto oggetto di analisi successive nei prossimi capitoli, dove tali studi troveranno applicazione in simulazioni di Power Flow effettuate con il software Neplan<sup>®</sup>.

### 4.1 Sistemi real-time

I sistemi in real-time consentono, attraverso una valutazione istantanea delle condizioni di esercizio della linea, di fornire ai servizi di dispacciamento la corrente che ogni elettrodotto può supportare. In questo modo istante per istante è possibile modulare la corrente, facendo in modo che in condizioni climatiche favorevoli, ed in determinate condizioni di carico, sia possibile incrementare la portata statica degli elettrodotti.

Questi sistemi sono attualmente in fase di sperimentazione in tutta Europa, si prevede che da qui a qualche anno possano essere ampiamente utilizzati sia in Italia che all'estero.

Di seguito si riportano alcuni sistemi in real-time presenti in letteratura.

#### 4.1.1 I sistemi DTR (Dynamic Thermal Rating)

I sistemi DTR consentono di valutare in tempo reale, in funzione dei parametri atmosferici che condizionano la dispersione del calore generato per effetto Joule, l'effettivo impegno massimo supportabile dal conduttore senza la progressiva riduzione delle proprie caratteristiche meccaniche.

L'architettura del sistema è costituita da una o più stazioni meteorologiche, secondo lo sviluppo della linea, che provvedono alla misura delle condizioni ambientali in prossimità della linea elettrica. Queste informazioni vengono trasmesse ad un elaboratore remoto che, sulla base del modello termico del conduttore, effettua in tempo reale una previsione della portata per determinati intervalli di tempo, senza un'eccessiva riduzione dei franchi al suolo e sulle opere attraversate.

In Figura 21 si riporta l'architettura di un sistema DTR.

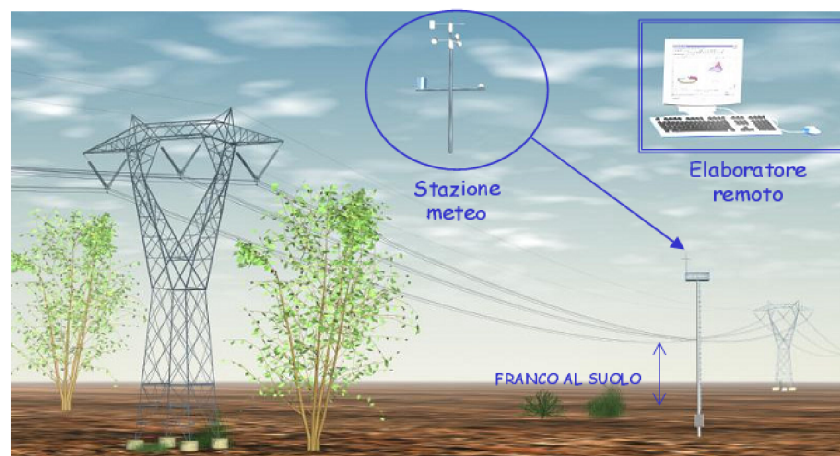


Figura 21. Architettura di un sistema DTR

Ciascuna stazione di acquisizione dei parametri ambientali è costituita da:

- un sistema di alimentazione elettrica;
- una centralina elettronica con microprocessore;
- una serie di sensori per la misura dei parametri;
- un sistema di trasmissione dati.

Inoltre, ad integrazione del sistema DTR vengono impiegati gli strumenti *Donut*, rappresentanti lo stato dell'arte della strumentazione per l'acquisizione e la memorizzazione di dati per applicazioni su linee aeree in alta tensione.



L'apparecchio, riportato in Figura 22, è una ciambella da installare sul conduttore delle linee e nella quale sono racchiusi: sensore di corrente, sensore di temperatura, alimentatore e flash memory per la memorizzazione dei dati.



Figura 22. Donut installato su un conduttore di fase

Il Donut trasmette i dati su richiesta, utilizzando un modem GSM posto anch'esso all'interno del dispositivo.

Il software di gestione, da installare su un normale PC con sistema operativo Windows, utilizzerà i dati ricevuti dal Donut per creare un database con la corrente e la temperatura del conduttore.

Questi sistemi attualmente sono in fase di sperimentazione in Italia, e sono stati utilizzati in Sicilia sulla linea a 220kV Misterbianco-Melilli con ottimi risultati [8]-[13].

#### 4.1.2 Modello termico – meccanico

Questo modello è stato sviluppato dalla “Faculty of Electrical Power Engineering Mahanakorn University” a Bangkok in Thailandia. Le equazioni che mettono in relazione il tiro e la freccia massima in una linea di trasmissione sono:

$$y = \frac{T_0}{w} \left( \cosh\left(\frac{wl}{2T_0}\right) - 1 \right) \approx \frac{wl^2}{8T_0} \quad (4.1)$$

$$S = \frac{T_0}{w} \operatorname{si} \operatorname{nh}\left(\frac{wl}{T_0}\right) \approx l + \frac{w^2 l^3}{24T_0^2} \approx l + \frac{8y^2}{3l} \quad (4.2)$$

$$T_A = T_0 \cos\left(\frac{wl}{2T_0}\right) \approx T_0 + \frac{w^2 l^2}{8T_0} \approx T_0 + wy \quad (4.3)$$

Dove:

- $w$  è peso del conduttore per unità di lunghezza [kg/m];
- $l$  è la distanza tra i sostegni [m];
- $T_0$  è il tiro a metà della linea di trasmissione [kg];
- $y$  è la freccia massima [m];
- $S$  è la lunghezza del conduttore tra i punti di attacco [m];
- $T_A$  è il tiro all'inizio della linea di trasmissione [kg].

Quando i conduttori della linea di trasmissione sono installati, la loro lunghezza può variare al variare della temperatura e delle condizioni climatiche, subendo dilatazioni termiche e allungamenti elastici. Si riporta di seguito l'equazione del cambiamento di stato:

$$S_1 - S_0 = [\alpha(t_1 - t_0) + \frac{1}{AE}(T_1 - T_0)]S_0 \quad (4.4)$$

Dove:

- $S_0$  e  $T_0$  sono la lunghezza del conduttore ed il suo tiro alla temperatura  $t_0$ ;
- $S_1$  e  $T_1$  sono la lunghezza del conduttore ed il suo tiro alla temperatura  $t_1$ ;
- $A$  è la sezione del conduttore [mm<sup>2</sup>];
- $E$  è il modulo di Young [kg/mm<sup>2</sup>];
- $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica [(°C)<sup>-1</sup>].

Dalla (4.4) è stato dimostrato che la temperatura e il peso dei conduttori comportano degli abbassamenti dello stesso, e quindi determinano una diminuzione dei franchi dal terreno. Pertanto, la temperatura limite sarà quella per la quale si avrà un adeguato franco dal terreno che non comporti distanze inferiori ai limiti.

La temperatura del conduttore limita la capacità di trasporto della linea come si evince dalla (4.5):

$$I^2 R(t_{cr}) + Q_s = Q_r(t_{cr}, t_{air}) + Q_c(t_{cr}, t_{air}, v) \quad (4.5)$$

Dove

- $Q_s$  è la potenza assorbita per irraggiamento solare [W];
- $Q_r$  è la potenza dissipata per radiazione solare [W];

- $Q_c$  è la potenza dissipata per convezione [W];
- $T_{cr}$  temperatura critica del conduttore [°C];
- $T_{air}$  temperatura dell'aria [°C];
- $v$  la velocità del vento [km/h];

dalla (4.5) ricavando i parametri  $Q_s$ ,  $Q_r$  e  $Q_c$  si risale alla corrente massima che può transitare nella linea.

$$Q_s = \gamma s d L \quad (4.6)$$

$$Q_c = \Delta t \left( \frac{5.728 \times 10^{-4}}{T_a^{0.123}} \sqrt{\frac{Pv}{d}} \right) S_a \quad (4.7)$$

$$Q_r = 5.704 E_m \left[ \left( \frac{T_{cr}}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_{air}}{1000} \right)^4 \right] S_a \quad (4.8)$$

Dove

- $\gamma$  è il coefficiente di radiazione solare;
- $s$  è l'intensità della radiazione [W/cm<sup>2</sup>];
- $d$  è il diametro del conduttore [cm];
- $L$  è la lunghezza del conduttore [cm];
- $P$  è la pressione atmosferica [atm];
- $v$  è la velocità del vento [km/h];
- $S_a$  è la superficie laterale del conduttore [cm<sup>2</sup>];
- $\Delta t$  è la differenza di temperatura tra  $T_{cr}$  e  $T_{air}$ ;
- $T_{cr}$  è la temperatura del conduttore in Kelvin;
- $T_{air}$  è la temperatura del conduttore in Kelvin;
- $T_a$  è la media tra  $T_{cr}$  e  $T_{air}$ ;
- $E_m$  è il coefficiente di emissività;

Sostituendo le (4.6), (4.7), (4.8) nella (4.5) si ottiene:

$$I = \sqrt{\frac{1}{R_l} \left\{ \left[ \left( \frac{5.728 \times 10^{-4}}{T_a^{0.123}} \sqrt{\frac{Pv}{d}} \right) \Delta t + 5.704 E_m \left[ \left( \frac{T_{cr}}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_{air}}{1000} \right)^4 \right] \right] S_a - \gamma s d L \right\}} \quad (4.9)$$

Rispetto ai sistemi off-line, che verranno esposti successivamente, vengono presi in considerazione i parametri meccanici della linea ed inoltre nel calcolo della

massima corrente che può circolare si tiene conto dell'equazione del cambiamento di stato.

Attraverso gli step successivi avviene la valutazione della massima corrente che può transitare nella linea:

- inserimento dei dati d'ingresso: temperatura del conduttore ( $t_c^0$ ), tiro ( $T_0^0$ ), temperatura dell'aria ( $t_{air}^0$ ), velocità del vento ( $v$ );
- si settano i valori di freccia massima considerando il franco minimo dal terreno come indicato dalle norme (in funzione della tensione d'esercizio);
- si calcola  $S_0$  da:  $S = \frac{2T_0}{w} \sin\left(\frac{wl}{2T_0}\right)$ ;
- si calcola  $T_1$  da:  $T_1 \approx \frac{wl^2}{8y}$ ;
- si calcola  $t_1$  da:  $S_1 - S_0 = \left[ \alpha(t_1 - t_0) + \frac{1}{AE}(T_1 - T_0) \right] S_0$ ;
- si calcola la massima corrente che può transitare nella linea attraverso la (4.9).

Ogni step precedente viene di seguito spiegato:

1. dalla misura della temperatura del conduttore  $t_c^0$ , dell'aria ( $t_{air}^0$ ), del tiro ( $T_0^0$ ) e dalla velocità del vento ( $v$ ) in un determinato istante, si calcola la lunghezza iniziale del conduttore  $S_0$  attraverso la (4.2).
2. dalla massima freccia assegnata ( $y$ ) si calcolano attraverso la (4.2) e (4.3) la lunghezza della linea  $S_1$  e il tiro  $T_1^0$ .
3. dalla (4.4) si ottiene la temperatura  $t_c^1$  che rappresenta la temperatura del conduttore per la quale si ha la freccia massima.
4. attraverso la (4.9) sostituendo i parametri ottenuti si trova la massima corrente che può transitare sulla linea.

Diverse applicazioni sono presenti in letteratura. [14]

### 4.1.3 Ampacimon

Ampacimon è un sensore intelligente collegato direttamente ad una linea elettrica aerea. Questo consente di valutare in tempo reale l'abbassamento del conduttore senza la necessità di avere a disposizione dei dati supplementari (come il carico, dati topologici, dati conduttore e dati del meteo).

Sviluppato con successo in Belgio, rileva le vibrazioni del conduttore alla frequenza di oscillazione, e valuta direttamente l'abbassamento della freccia.

Una volta che l'unità Ampacimon, mostrata in Figura 23, viene installata nel tratto di conduttore scelto, viene alimentata dal campo magnetico locale, ed è quindi autonoma.

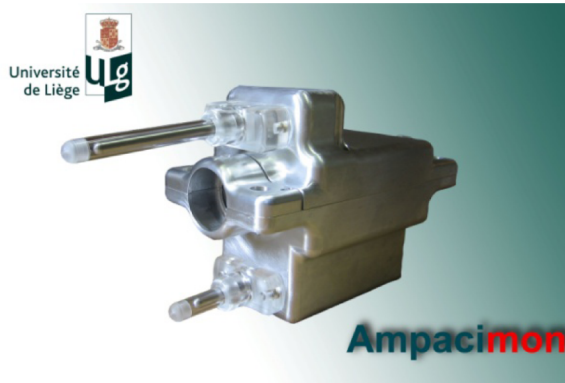


Figura 23. Dispositivo Ampacimon

In presenza di una campata, l'unico parametro necessario è la frequenza di oscillazione, in quanto vi è una relazione tra tale frequenza e l'abbassamento della freccia.

Utilizzando un sistema di rilevamento del movimento della campata si rileva l'abbassamento senza la necessità di nessun altro dato.

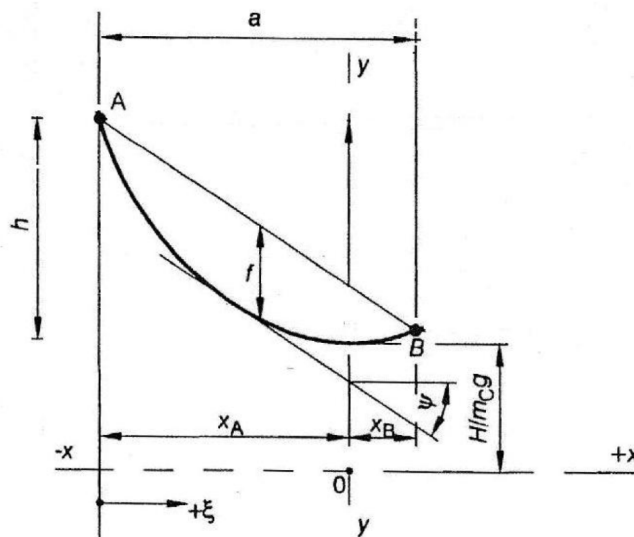


Figura 24. Catenaria di un conduttore con attacchi a dislivello

Con riferimento alla Figura 24, si definiscono:

- $a$  la distanza orizzontale tra due punti di attacco [m];
- $h$  il dislivello [m];
- $f$  la freccia [m];
- $X_A$  e  $X_B$  le coordinate punti di attacco [m];
- $m_c$  la massa del conduttore per unità di lunghezza [kg/m];
- $g$  l'accelerazione gravitazionale [9.81 m/s<sup>2</sup>];
- $\psi$  l'angolo [adimensionale];
- $H$  il tiro orizzontale [N].

L'equazione della catenaria utilizzata è la seguente:

$$y(x) = \frac{H}{m_c g} \cosh\left(\frac{m_c g a x}{H}\right) \quad (4.10)$$

Nell'ipotesi di campata a livello  $L=a$  (lunghezza della campata uguale alla distanza tra i due punti di attacco della linea) la freccia massima si può trovare come:

$$f_{max} = \frac{m_c g L^2}{8H} \quad (4.11)$$

la frequenza di oscillazione della linea vale:

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{H}{m_c}} \quad (4.12)$$

esprimendo  $H$  nella (4.11) in funzione di  $f_{max}$  e sostituendo nella (4.12) si ottiene:

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{H}{m_c}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\left(\frac{m_c g L^2}{8 f_{max}}\right)}{m_c}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{8 f_{max}}} \quad (4.13)$$

dalla quale, si ricava la freccia massima come:

$$f_{max} = \frac{1}{32} \frac{g}{f_0^2} \quad (4.14)$$

così facendo si conosce istante per istante l'abbassamento massimo del conduttore, e quindi il possibile incremento o meno della portata in corrente della linea.

Alcuni moduli sono stati installati in Belgio su alcune linee di trasmissione, ottenendo degli ottimi risultati in termini di incremento della corrente e conseguentemente della potenza [14]-[16].

## 4.2 Sistemi off-line

Grazie alla collaborazione che si è instaurata negli ultimi anni con la sede siciliana di Terna S.p.A., al fine di incrementare la potenza prodotta da FER in Sicilia, sono stati effettuati alcuni studi off-line per incrementare la portata in corrente degli elettrodotti nell'isola.

Da un lato si sono sfruttati la tecnologia LIDAR ed i sistemi GIS [17] [18], dall'altro sono stati effettuati degli studi di reconductoring [19], utilizzando come riferimento i principali conduttori HTLS presenti in letteratura. Di seguito si riportano entrambe le tecniche, e le applicazioni sperimentali effettuate.

### 4.2.1 Sistemi georeferenziati per l'incremento della portata degli elettrodotti

#### 4.2.1.1 I sistemi GIS e LIDAR

Gli operatori delle reti elettriche hanno bisogno d'informazioni dettagliate circa la posizione e la condizione del loro patrimonio sia in termini di stazioni e sottostazioni, sia in termini di linee. Di seguito in Figura 25 si riporta uno schema a blocchi che esplica gli step utili alla comprensione di come si arrivi ai sistemi GIS e come questi siano utili agli operatori di rete per la manutenzione degli impianti.

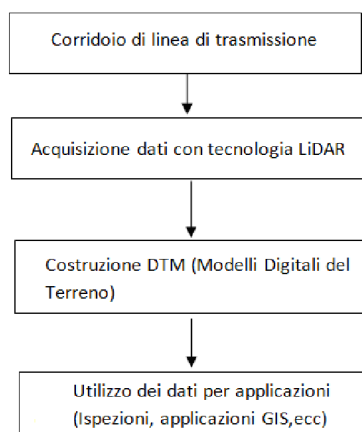


Figura 25. Schema a blocchi costruzione sistemi GIS

L'applicativo georeferenziato in ambiente GIS, utilizzato da Terna S.p.A., consente di analizzare il comportamento dei conduttori e di calcolare la massima

corrente ammissibile al fine di verificare i franchi dal terreno e dalle altre opere interferenti [22].

La tecnologia LIDAR, invece, è basata sulla scansione del territorio sorvolato da un aereo per mezzo di un telemetro laser che misura la distanza tra il punto di emissione, rappresentato dal telemetro ed il punto di riflessione corrispondente ad un generico punto appartenente alla superficie rilevata colpito dal laser.

In Figura 26 si riporta la modalità di esecuzione di un rilievo LIDAR.

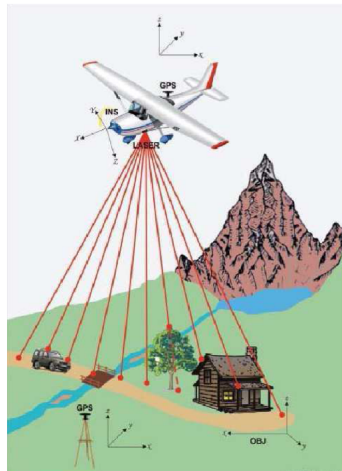


Figura 26. Modalità di esecuzione del rilievo LIDAR

L'impulso elettrico prodotto da un generatore crea un raggio di luce infrarossa (lunghezza d'onda  $\lambda=1064\text{nm}$ ), con una divergenza variabile a seconda della qualità dello strumento; il segnale riflesso dall'elemento colpito viene captato da un fotodiodo ricevitore che genera un segnale elettrico di ricezione. Il telemetro misura il tempo  $\Delta t$ , denominato tempo di volo, impiegato dall'impulso laser a percorrere il percorso di andata e ritorno. Il tempo di volo è misurato tramite un orologio con una frequenza stabilizzata dal quarzo. La distanza di presa ( $D$ ) è una funzione del tempo di volo  $\Delta t$ :

$$D = (\Delta t \cdot c)/2 \quad (4.14)$$

Dove  $c$  rappresenta la velocità di propagazione del segnale e, quindi, in questo caso, la velocità della luce ( $3 \cdot 10^8$  m/s). Il risultato fondamentale di un rilievo LIDAR è la restituzione delle coordinate  $x, y, z$  di ogni misura. Per calcolare le coordinate dei punti colpiti, oltre alla distanza fra il veicolo ed il punto a terra, è necessario conoscere anche la posizione e l'assetto del velivolo in ogni istante. A questo scopo



sono integrati nel sistema LIDAR aerotrasportato un sistema inerziale che determina l'assetto del velivolo rilevando i tre gradi di libertà dovuti a rollio, beccheggio e deriva ed un GPS che determina la posizione assoluta del telemetro rispetto al sistema di coordinate di riferimento.

Una volta determinati mediante sensori GPS e sistema inerziale, le coordinate del telemetro e l'orientamento della retta normale all'aereo, è possibile ricavare l'equazione della retta passante per il sensore montato sull'aereo ed il punto colpito dall'impulso laser. La conoscenza della distanza fra i due punti consente, infine di ricavare le coordinate x, y, z del punto bersaglio.

Alcuni strumenti misurano, oltre al tempo di volo necessario per determinare la posizione del punto colpito, l'intensità del segnale di ritorno. L'intensità laser è un'informazione particolarmente interessante in quanto rispecchia direttamente le caratteristiche fisiche di riflettenza delle superfici colpite.

Mediante opportune operazioni di post-processing basate sull'utilizzo di algoritmi di filtraggio della nuvola di punti rilevati in origine (*raw data*), che contiene quindi dati relativi ad eventuale vegetazione, edifici, veicoli, conduttori di linee elettriche, uccelli in volo ecc., è possibile derivare mediante la scelta di opportuno metodo di interpolazione il Modello Digitale del Terreno (DTM) costituito dalle sole quote dei soli punti a terra.

Si parla, invece, di Modello Digitale delle Superfici (DSM) nel caso di un modello digitale costruito a partire dai dati LIDAR non filtrati[20] [21].

Un esempio di un rilievo LIDAR è riportato in Figura 27.

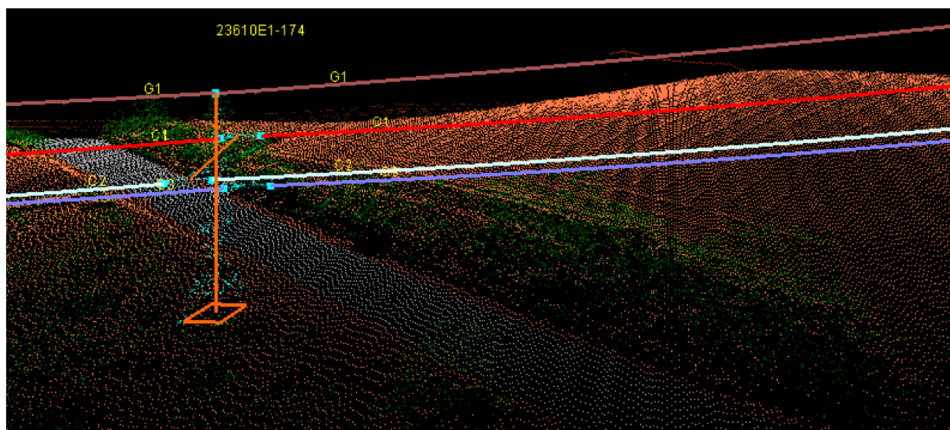


Figura 27. Estrapolazione dal DPM 3D della linea

#### 4.2.1.2 Applicazioni della tecnologia LIDAR sulla rete AT siciliana

L'analisi è stata svolta per tre elettrodotti eserciti a 150kV all'interno del territorio siciliano. Questi, di particolare rilevanza per posizione geografica e vicinanza a grossi punti di produzione da FER, sono:

1. Linea Misterbianco-Belpasso, in provincia di Catania con conduttore ACSR di diametro 22.8mm.
2. Linea Ciminna-Mulini/Ciminna-Cappuccini, in provincia di Palermo con conduttore ACSR da 31.5mm di diametro.
3. Linea Prizzi-Corleone, in provincia di Palermo con conduttore ACSR da 31.5mm di diametro.

Inizialmente si è proceduti a calcolare la massima temperatura ammissibile per i conduttori in modo da rispettare i vincoli delle distanze dagli elettrodotti imposte dal Decreto Ministeriale n. 449 del 21 marzo 1988. Dopodiché, si è proceduto al calcolo della massima corrente ammissibile, sfruttando il modello matematico di Schurig e Frick.

Il modello si rifà alla seguente relazione [23]:

$$P_j = P_r + P_c - P_s \quad (4.15)$$

Dove si è indicato con:

- $P_j$  le perdite per effetto joule (W);
- $P_r$  le perdite radiative per unità di superficie ( $W/cm^2$ ). Dipendono dalla temperatura dell'aria, dal diametro del conduttore e dall'emissività;
- $P_c$  la potenza dissipata per convezione per unità di superficie ( $W/cm^2$ ). Dipende dalla temperatura dell'aria, dal diametro del conduttore, dalla velocità del vento e dalla sua direzione;
- $P_s$  la potenza assorbita per irraggiamento solare ( $W/cm^2$ ).

La corrente, transitante in linea, si valuta attraverso la relazione:

$$I = 5.6 * \frac{\sqrt{(P_r + P_c - P_s) * 10^4 * D}}{R_T} \quad (4.16)$$

dove:

- $D$  è il diametro del conduttore (cm);
- $R_T$  è la resistenza chilometrica del conduttore riportata alla temperatura del conduttore ( $\Omega/km$ ).

Quindi, al fine di poter calcolare la massima corrente ammissibile, conoscendo il diametro del conduttore e la sua resistenza chilometrica, si sono ricavati  $P_j$ ,  $P_c$ ,  $P_r$  e  $P_s$ .

#### 4.2.1.3 Risultati

##### A. Linea Misterbianco-Belpasso

La massima temperatura ammissibile dai conduttori è stata trovata in 55°C. A questo punto si procede al calcolo della massima corrente che può circolare nei conduttori. Questa è valutata in due casi, invernale ed estivo, in funzione delle particolari condizioni climatiche. Il calcolo è stato effettuato sia con il metodo di Schurig e Frick, sia con il metodo descritto dalla norma CEI 11-60 [24], considerando le caratteristiche del conduttore e i parametri ambientali, riportati in Tabella 6.

	Inverno	Estate
Temperatura Ambiente [C°]	20	33
Temperatura Conduttore [C°]	55	55
Velocità del vento [km/h]	6	6
Coefficiente di irraggiamento solare [W/m <sup>2</sup> ]	1029.49	1029.49
Coefficiente $\epsilon$ di emissività del conduttore	0.5	0.5
Condizioni del cielo	Pulito	Pulito
Irraggiamento	SI	SI

Tabella 6. Caratteristiche climatiche Linea A

La temperatura esterna e la velocità del vento sono state individuate considerando la loro serie storica degli ultimi dieci anni in corrispondenza della stazione meteorologica di Catania Fontanarossa. I dati assunti nella (4.16), che consentono di calcolare la massima corrente ammissibile, sono i peggiori della serie, ovvero quelli che forniscono i valori più bassi di corrente.

In Tabella 7 e Tabella 8 sono riportati i valori della massima corrente ammissibile secondo i metodi di calcolo utilizzati nelle due condizioni ambientali invernale ed estiva.

<b>CASO A: Condizione Invernale</b>			
	<i>Shurig &amp; Frick</i>	<i>CEI 11-60</i>	<i>CEI 11-60 M.</i>
$I_{MAX}$ [A]	695	568	739

Tabella 7. Massima corrente che può transitare nella linea A in inverno

<b>CASO A: Condizione Estiva</b>			
	<i>Shurig &amp; Frick</i>	<i>CEI 11-60</i>	<i>CEI 11-60 M.</i>
$I_{MAX}$ [A]	520	405	526

Tabella 8. Massima corrente che può transitare nella linea A in estate

### **B. Linea Ciminna-Mulini/Ciminna-Cappuccini**

In questo caso la massima temperatura è stata trovata in 76 °C. Essendo la linea in provincia di Palermo, la temperatura esterna e la velocità del vento, sono state individuate, andando a considerare la serie storica in corrispondenza della stazione meteorologica di Palermo Punta Raisi.

Parametri e risultati relativi alla linea B Ciminna-Mulini/Ciminna-Cappuccini sono riportati in Tabella 9, Tabella 10 e Tabella 11.

	<b>Inverno</b>	<b>Estate</b>
Temperatura Ambiente [C°]	19	30
Temperatura Conduttore [C°]	76	76
Velocità del vento [km/h]	9	8
Coefficiente di irraggiamento solare [W/m <sup>2</sup> ]	1029.49	1029.49
Coefficiente $\epsilon$ di emissività del conduttore	0.5	0.5
Condizioni del cielo	Pulito	Pulito
Irraggiamento	SI	SI

Tabella 9. Caratteristiche climatiche Linea B

<b>CASO B: Condizione Invernale</b>			
	<i>Shurig &amp; Frick</i>	<i>CEI 11-60</i>	<i>CEI 11-60 M.</i>
$I_{MAX}$ [A]	1498	869	1130

Tabella 10. Massima corrente che può transitare nella linea B in inverno

<b>CASO B: Condizione Estiva</b>			
	<i>Shurig &amp; Frick</i>	<i>CEI 11-60</i>	<i>CEI 11-60 M.</i>
$I_{MAX}$ [A]	1294	619	805

Tabella 11. Massima corrente che può transitare nella linea B in estate

### C. Linea Prizzi - Corleone

In questo caso la massima temperatura ammissibile dei conduttori sarà dettata dai problemi di ricottura che possono verificarsi, specie nei giunti, che comporterebbero una conseguente diminuzione della resistenza meccanica. Per la linea in oggetto, ammettendosi in genere una sovratemperatura massima di 40°C rispetto ad una temperatura massima ambientale di 40°C, si ha che la massima temperatura raggiungibile dal conduttore è di 80°C.

Essendo la linea in provincia di Palermo le condizioni climatiche sono assunte uguali a quelle considerate per la linea B. I risultati dei calcoli per questa linea sono ugualmente riportati in Tabella 12 e Tabella 13.

<b>CASO C: Condizione Invernale</b>			
	<i>Shurig &amp; Frick</i>	<i>CEI 11-60</i>	<i>CEI 11-60 M.</i>
$I_{MAX}$ [A]	1546	869	1130

Tabella 12. Massima corrente che può transitare nella linea C in inverno

<b>CASO C: Condizione Estiva</b>			
	<i>Shurig &amp; Frick</i>	<i>CEI 11-60</i>	<i>CEI 11-60 M.</i>
$I_{MAX}$ [A]	1349	619	805

Tabella 13. Massima corrente che può transitare nella linea C in estate.

In Tabella 14 il riepilogo delle correnti ottenute.

	$T_x$ [°C]	<b>MASSIMA CORRENTE AMMISSIBILE [A]</b>					
		<b>INVERNO</b>			<b>ESTATE</b>		
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>CASO A</b>	55	695	568	739	520	405	526
<b>CASO B</b>	76	1498	869	1130	1294	619	805
<b>CASO C</b>	80	1546	869	1130	1349	619	805

Tabella 14. Riepilogo delle correnti ottenute

In Tabella 14 si è indicato con  $T_x$  la massima temperatura ammissibile dal conduttore e con 1, 2, 3 i metodi di calcolo adoperati:

- 1- metodo di Schurig e Frick;
- 2- metodo fornito dalla norma CEI 11-60;
- 3- metodo fornito dalla norma CEI 11-60 maggiorata.

Come ci si aspettava, maggiore è la temperatura che il conduttore può assumere, maggiori saranno le correnti che potranno transitare sulla linea, e quindi le potenze. Altresì i valori di corrente ottenuti sono superiori a quelli proposti dalla norma CEI 11-60, garantendo potenzialmente un migliore sfruttamento degli elettrodotti.

Considerato che le linee 150kV generalmente sono esercite con valori di corrente pari a 500A in inverno e 300A in estate, la Tabella 15 mostra come, attraverso una analisi statica sulla rete, è possibile incrementare la portata in corrente degli elettrodotti.

	$T_x [^{\circ}\text{C}]$	Incremento Percentuale di corrente					
		Inverno			Estate		
		<i>C.I.</i> [A]	<i>C.S.F.</i> [A]	<i>I.</i> %	<i>C.I.</i> [A]	<i>C.S.F.</i> [A]	<i>I.</i> %
<b>CASO A</b>	55	500	695	39%	300	520	73%
<b>CASO B</b>	76	500	1498	200%	300	1294	331%
<b>CASO C</b>	80	500	1546	209%	300	1349	350%

Tabella 15. Incrementi percentuali consentiti

In Tabella 15, si è indicato con:

- C.I.: Corrente iniziale;
- C.S.F.: Corrente calcolata con il metodo di Shurig & Frick;
- I.: Incremento percentuale consentito.

#### 4.2.2 I conduttori HTLS per l'incremento della portata degli elettrodotti

Attualmente sulle linee aeree in Italia, il conduttore unificato di riferimento è del tipo ACSR. Pertanto, un ulteriore metodo per incrementare la portata in corrente degli elettrodotti potrebbe essere la sostituzione degli attuali conduttori tradizionali, con altri, cosiddetti ad "alta capacità di trasporto". Questo meccanismo viene chiamato "reconductoring".

Studi di reconductoring sono stati effettuati su alcune linee siciliane. Queste sono poste in prossimità di grossi centri di produzione da FER.

Gli studi di seguito riportati, fanno vedere come attraverso l'utilizzo di questi conduttori di ultima generazione, un possibile incremento della portata in corrente degli elettrodotti, e quindi un possibile aumento della produzione di FER, è possibile.

#### **4.2.2.1 Conduttori HTLS di riferimento**

Come conduttori di riferimento, tra quelli presenti in letteratura, sono stati presi in considerazione i seguenti:

- A. Conduttore Gap-type, G(Z)TACSR (Gap Built-in Heat Resistant Aluminum Alloy Conductor), con un diametro di 22.6 millimetri. [25]-[27]
- B. Conduttore ZTACIR (Heat Resistant Aluminum Alloy Conductor Invar Reinforced) con un diametro di 22.75 millimetri. [28]-[30]
- C. Conduttore ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported) con un diametro di 20.9 millimetri. [31][32]

I conduttori ad alta temperatura sono elettricamente e dimensionalmente molto simili al conduttore ACSR convenzionale, ma presentano, come caratteristica fondamentale, un più basso coefficiente di dilatazione termica. La conseguenza diretta è che, a parità di freccia, i conduttori possono assumere una temperatura più elevata, garantendo un aumento della portata di corrente della linea [33].

##### **A. G(Z)TACSR 22.6mm di diametro**

Il conduttore Gap-type ha una costruzione unica [34]. La Figura 28 mostra la sezione trasversale del conduttore G(Z)TACSR. C'è un piccolo spazio tra anima in acciaio e lo strato più interno alluminio riempito da grasso resistente al calore. In questo modo la tensione meccanica viene completamente trasferita all'anima in acciaio.

Superato il punto di ginocchio, che si presenta a temperature ridotte, il basso coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio consente di sfruttare su una più ampia gamma di temperature il conduttore. Il gap è riempito con grasso resistente al calore (filler), al fine di ridurre l'attrito tra anima in acciaio e strato di alluminio, e per impedire la penetrazione dell'acqua e del salino.

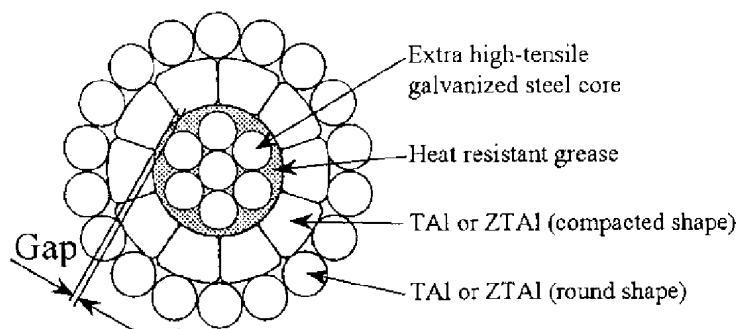


Figura 28. Sezione trasversale conduttore G(Z)TACSR

L'installazione del conduttore Gap-Type richiede una particolare procedura molto più complessa dei conduttori tradizionali [35]. Infatti, in questo caso, risulta necessario effettuare una delle due morse di amarro di un tratto di linea direttamente sul traliccio, e non a terra come avviene normalmente.

Requisito fondamentale per l'adeguato funzionamento del conduttore è quello dell'assenza di tiro sui mantelli di lega d'alluminio nelle condizioni di posa. Per fare questo, in una delle due morse di amarro della sezione, è necessario tirare e ammorzare prima l'anima in acciaio.

Questa operazione richiede:

- la strefolatura di un tratto dei mantelli di lega di alluminio al fine di consentire l'inserimento di una morsa a cuneo sull'anima di acciaio per evitare il tensionamento di questa;
- la realizzazione della compressione dell'embolo di acciaio sull'anima (tenuta nel frattempo dalla morsa a cuneo);
- la ricomposizione dei mantelli di lega di alluminio (dopo la rimozione della morsa a cuneo).

Una tra le operazioni più delicate a questo riguardo è la ricomposizione dei mantelli e la successiva compressione del manicotto di alluminio [36].

Questa particolare e complessa procedura di tesatura, associata all'elevato costo del conduttore, comporta la mancata installazione in Italia del conduttore sulle reti AT.



### B. ZTACIR 22.75mm di diametro

I conduttori ZTACIR [37] ad alta temperatura in leghe termoresistenti di alluminio, sono caratterizzati da:

- un mantello esterno realizzato con leghe di alluminio-zirconio con un limite termico di funzionamento superiore rispetto a quello dell'alluminio tradizionale;
- una portante realizzata con materiali a ridotto coefficiente di dilatazione termica, come le leghe di ferro-nichel rivestite di alluminio (ACI, Aluminium Clad Invar), che permette ai conduttori per alta temperatura di mantenere frecce paragonabili a quelle dei conduttori tradizionali, pur eserciti a temperature più elevate.

La Figura 29 mostra la sezione trasversale di un conduttore ZTACIR.

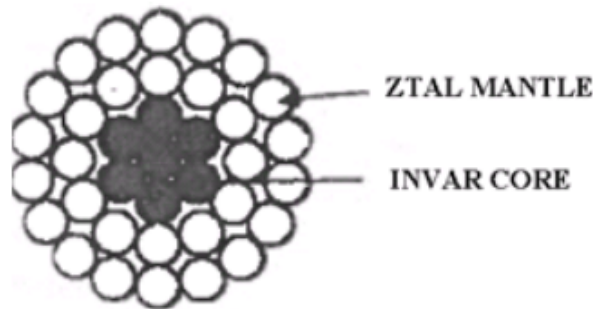


Figura 29. Sezione trasversale conduttore ZTACIR

L' INVAR è una lega di ferro-nichel (Fe-Ni 36%) con un basso coefficiente di dilatazione termica, pari a circa un terzo di quella del trefolo di acciaio zincato o rivestito di alluminio [38].

Questa combinazione di materiali consente di incrementare la portata in corrente degli elettrodotti, rispetto all'utilizzo dei conduttori tradizionali.

I conduttori di tipo ZTACIR, dato il ridotto coefficiente di dilatazione termica del nucleo, presentano una temperatura di ginocchio molto più bassa del conduttore ACSR e solitamente all'interno del campo di funzionamento nominale del conduttore.

I vantaggi di conduttori ZTACIR diventano evidenti dopo una temperatura di esercizio di circa 100-120°C. Attualmente questi conduttori sono installati su una trentina di elettrodotti AT all'interno del territorio nazionale, di cui sei in Sicilia.

### C. ACSS 20.9mm di diametro

Il conduttore ACSS è descritto in [39]. La Figura 30 mostra la sezione trasversale del conduttore ACSS/TW (con conci trapezoidali). Il conduttore ACSS presenta un mantello in alluminio ricotto ed un anima in acciaio.

Il mantello che può raggiungere temperature molto elevate (250°C), presenta un comportamento fortemente plastico, riducendo la temperatura di ginocchio a quasi quella di installazione. Tuttavia la duttilità dell'alluminio fa sì che vi debba essere molta cura nell'imballaggio, nella movimentazione, nella posa e nell'applicazione della morsetteria.

L'anima presenta fili in acciaio a resistenza ultra elevata con rivestimento in lega Al95Zn5 e mishmetal (MUHST). Il carico meccanico come il Gap-Type è quasi completamente sostenuto dall'anima, quindi si devono utilizzare tecniche particolari di presa in carico del conduttore, in grado di trasferire il carico alla portante.

In queste condizioni, il coefficiente di dilatazione dei conduttori di questo tipo sarà vicino al valore fornito dal nucleo di acciaio, e che è dell'ordine di  $10\text{-}13 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

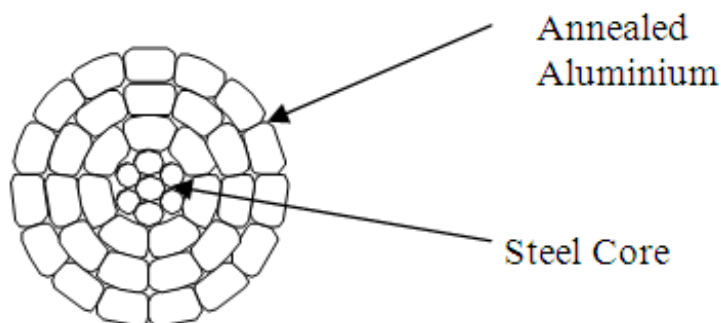


Figura 30. Sezione trasversale conduttore ACSS/TW

Questo valore, in confronto con quello dei conduttori convenzionali ( $18\text{-}22 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), comporta, a parità di temperatura del conduttore, una riduzione della freccia rispetto al conduttore ACSR equivalente, e di conseguenza, un aumento delle distanze verso terra.

Attualmente questo conduttore risulta installato in Italia su pochissimi elettrodotti in AT a 150kV, e su nessun elettrodotto siciliano.

La Tabella 16 mostra il confronto tra le caratteristiche elettriche e meccaniche dei conduttori utilizzati in questo studio.

	<b>Conduttori</b>			
	<i>ACSR</i>	<i>G(Z)TACSR</i>	<i>ZTACIR</i>	<i>ACSS</i>
Sezione [mm <sup>2</sup> ]	307.7	308.4	306.94	307.7
Carico di rottura [kgf]	9944	10962	10066	9901
Rdc a 20°C [ohm/km]	0.109	0.111	0.11068	0.10777
Peso [kg/km]	1068	1098	1083	1068
Coefficiente di dilatazione termica [10 <sup>-6</sup> /°C]	18.9	11.5	16.4 (corda ACI 4.7)	11.5

Tabella 16. Parametri dei conduttori HTLS

#### 4.2.2.2 Determinazione della portata in corrente di elettrodotti AT

L'analisi, svolta per tre elettrodotti eserciti a 150kV all'interno del territorio siciliano, ha seguito i seguenti passaggi:

- A. Calcolo della massima temperatura dei conduttori della linee scelte, al fine di rispettare i vincoli delle distanze dagli elettrodotti imposti dal DM n°449 del 1988 attraverso il software nelle disponibilità di Terna S.p.A. "DPM 3D"; e determinazione grafica, mediante interpolazione, della corrispondente massima temperatura dei conduttori HTLS.
- B. Calcolo, attraverso il modello matematico di Schurig e Frick, della massima corrente che può circolare sulle linee con conduttori ad alta temperatura, in funzione della massima temperatura ammissibile assunta dai conduttori, calcolata al punto A.

Le linee a 150kV oggetto di studio, battezzate rispettivamente in "Linea A", "Linea B" e "Linea C" che presentano attualmente conduttore ACSR da 22.8mm, sono:

- a. Bronte- Troina, in provincia di Catania;
- b. Ragusa-Ragusa 2, in provincia di Ragusa;
- c. Paternò-St.ne Paternò in provincia di Catania.

#### A. Calcolo massima temperatura ammissibile

La massima temperatura ammissibile per i conduttori tradizionali è stata trovata, dal software utilizzato per le simulazioni, in:

- 55°C per la linea Bronte-Troina;

- 60°C per la linea Ragusa-Ragusa 2;
- 80°C per la linea Paternò-St.ne Paternò.

La Figura 31, la Figura 32 e la Figura 33 mostrano la costruzione degli andamenti freccia- temperatura per una campata media di 350m, e le massime temperature corrispondenti per i conduttori HTLS ottenute per interpolazione grafica.

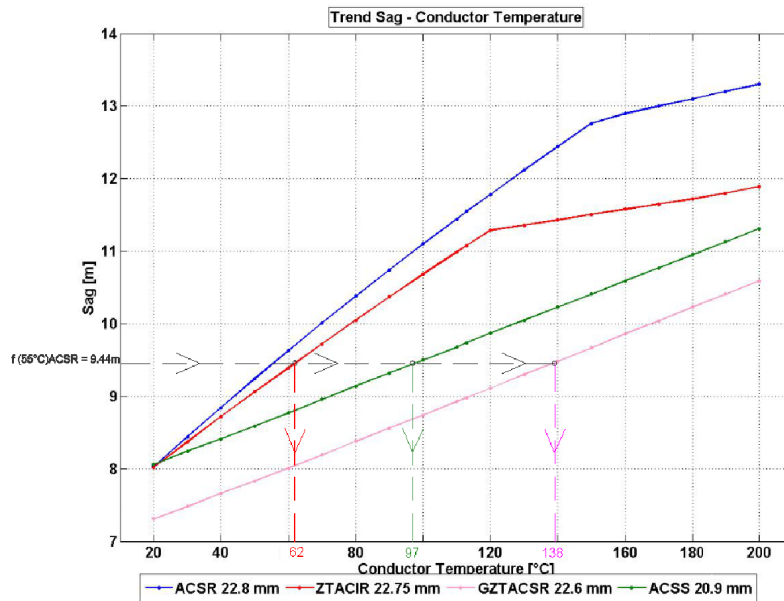


Figura 31. Andamento freccia-temperatura “linea A”

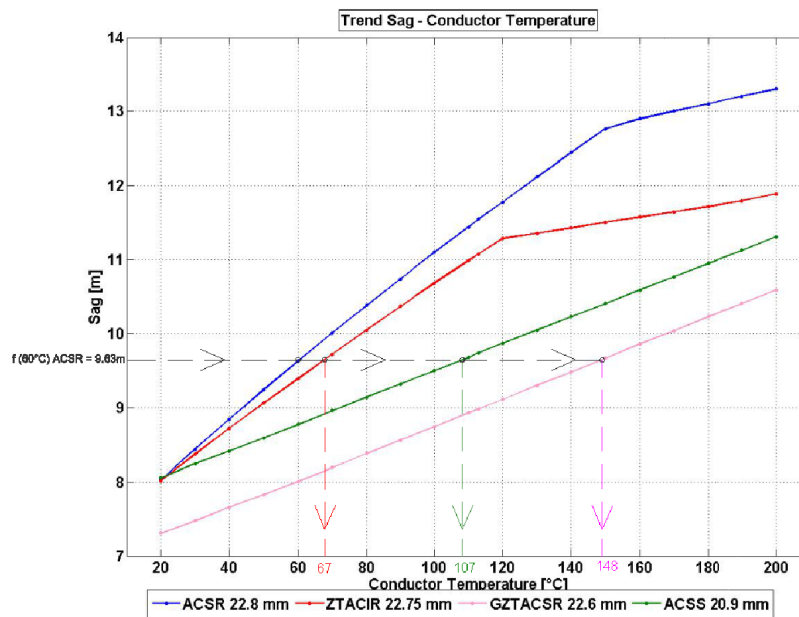


Figura 32. Andamento freccia-temperatura “linea B”

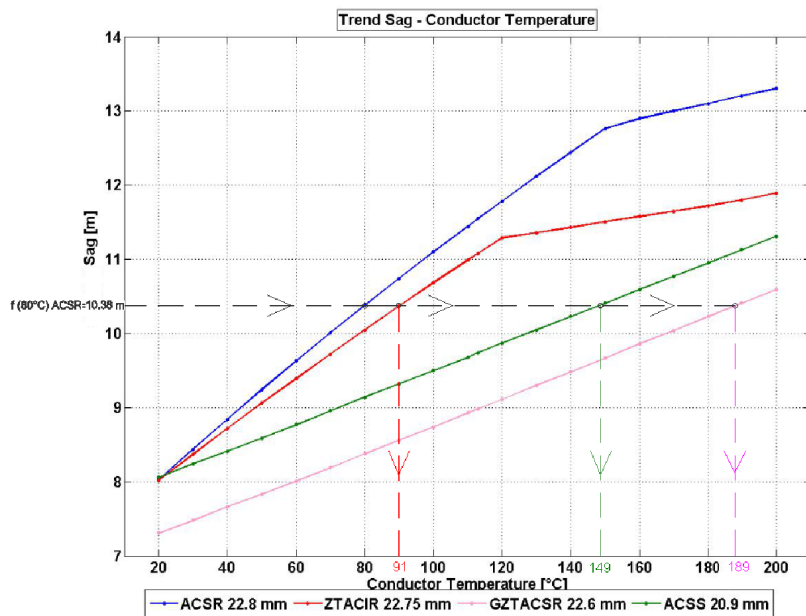


Figura 33. Andamento freccia-temperatura “linea C”

In Tabella 17 sono riportati i valori di temperatura dei conduttori HTLS che presentano la stessa freccia del conduttore tradizionale alla temperatura di verifica. Questi valori sono stati trovati per interpolazione grafica in Figura 31, Figura 32 e Figura 33.

Linea	T <sub>Max</sub> ACSR 22.8mm [°C]	Freccia [m]	T <sub>c</sub> ZTACIR 22.75 m [°C]	T <sub>c</sub> ACSS 20.9 mm [°C]	T <sub>c</sub> G(Z)TACSR 22.6 mm [°C]
a	55	9.44	62	97	138
b	60	9.63	67	107	148
c	80	10.38	91	149	189

Tabella 17. Confronto freccia-temperatura conduttori

Allo stesso valore di freccia non cambierà il franco elettrico, e quindi non si avranno la nascita di possibili interferenze con le opere attraversate (case, strade, ecc.).

### B. Calcolo massima corrente ammissibile

Una volta determinata al punto A la massima temperatura ammissibile per le linee oggetto di studio, si procede al calcolo della massima corrente ammissibile, sfruttando il modello matematico di Schurig e Frick, così come spiegato al paragrafo 4.2.1.2.

#### 4.2.2.3 Risultati

Tutte e tre le linee sono all'interno o vicino la provincia di Catania, quindi la temperatura e la velocità del vento sono state trovate valutando la serie storica degli ultimi dieci anni presso la stazione meteorologica di Catania Fontanarossa.

La Tabella 18 mostra le condizioni climatiche assunte per effettuare i calcoli. I dati assunti sono i peggiori della serie, ovvero quelli che forniscono i valori più bassi di corrente.

	<b>Inverno</b>	<b>Estate</b>
Temperatura Ambiente [C°]	20	33
Temperatura Conduttore [C°]	55	55
Velocità del vento [km/h]	6	6
Coefficiente di irraggiamento solare [W/ m <sup>2</sup> ]	1029.49	1029.49
Coefficiente $\epsilon$ di emissività del conduttore	0.5	0.5
Condizioni del cielo	Pulito	Pulito
Irraggiamento	SI	SI

Tabella 18. Caratteristiche climatiche delle linee oggetto di studio

#### A. Linea Bronte- Troina

La massima temperatura ammissibile dei conduttori è stata trovata in 55°C. La massima corrente che può circolare nei conduttori è stata valutata in due casi, invernale ed estivo, in funzione delle particolari condizioni climatiche. Il calcolo è stato fatto con il metodo di Schurig e Frick. Si sono considerate le caratteristiche dei conduttori di Tabella 16, e le condizioni climatiche riportate in Tabella 18.

Il calcolo della corrente massima è stato effettuato prima per il conduttore tradizionale ACSR 22.8mm, e successivamente per i conduttori ad alta temperatura. Il  $T_c$  assunto per ogni tipologia di conduttore HTLS è quello riportato nella Tabella 17. La Tabella 19 mostra la massima corrente che può transitare nella linea A, qualora questa fosse equipaggiata con conduttori HTLS.

LINEA A: Bronte - C.le Troina			I <sub>MAX</sub> [A]		Incremento %	
Conduttore	D [mm]	T <sub>c</sub> [°C]	Inverno	Estate	Inverno	Estate
ACSR	22.8	55	695	520	-	-
ZTACIR	22.75	62	766	617	10.2	18.7
ACSS	20.9	97	1023	929	47.2	78.7
G(Z)TACSR	22.6	138	1230	1160	77.0	123.1

Tabella 19. Massima corrente che può transitare nella linea A con conduttori HTLS

In estate, dove ci sono le condizioni climatiche peggiori, gli incrementi ottenuti per i conduttori ACSS e G(Z)TACSR comparati all'ACSR, sono molto alti e pari rispettivamente al 78.7 % e 123.1%. Invece con il conduttore ZTACIR l'incremento percentuale è basso, e solo del 18.7%.

#### B. Linea Ragusa - Ragusa 2

In questo caso la massima temperatura che il conduttore può assumere, al fine di verificare i vincoli imposti dal DM 21.03.88 è di 60 °C. Come per la linea A, si sono considerate le caratteristiche del conduttore di Tabella 16, ed i parametri ambientali riportati in Tabella 18. Inoltre, per calcolare la corrente massima ammissibile vengono usati i dati di T<sub>c</sub> riportati in Tabella 17.

La Tabella 20 mostra la massima corrente che può transitare nella linea B, qualora questa fosse equipaggiata con conduttori HTLS.

LINEA B: Ragusa - Ragusa 2			I <sub>MAX</sub> [A]		Incremento %	
Conduttore	D [mm]	T <sub>c</sub> [°C]	Inverno	Estate	Inverno	Estate
ACSR	22.8	60	747	590	-	-
ZTACIR	22.75	67	810	674	8.4	14.2
ACSS	20.9	107	1079	993	44.4	68.3
G(Z)TACSR	22.6	148	1271	1206	70.1	104.4

Tabella 20. Massima corrente che può transitare nella linea B con conduttori HTLS

Come nel caso A, in estate, gli incrementi di corrente possibili con i conduttori ACSS e G(Z)TACSR, comparati con l'ACSR sono alti, e pari al 68.3% e 104.4%. Con il conduttore ZTACIR l'incremento risulta ancora basso e pari al 14.2%.

Anche in inverno, quando si hanno le condizioni climatiche più favorevoli, l'incremento percentuale ottenibile con il conduttore ZTACIR è basso, e pari all' 8.4%.

### C. Linea Paternò -St.ne Paternò

In questo caso la massima temperatura ammissibile dei conduttori sarà dettata dai problemi di ricottura che possono verificarsi, specie nei giunti, che comporterebbero una conseguente diminuzione della resistenza meccanica.

Pertanto, per evitare problemi di ricottura, si suppone che la massima temperatura raggiungibile dal conduttore sia pari a 80 °C.

La Tabella 21 mostra la massima corrente che può transitare nella linea C, qualora questa fosse equipaggiata con conduttori HTLS.

<b>LINEA C: Paternò - St.ne Paternò</b>			<b>I<sub>MAX</sub> [A]</b>		<b>Incremento %</b>	
<i>Conduttore</i>	<i>D [mm]</i>	<i>Tc [°C]</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>
ACSR	22.8	80	913	799	-	-
ZTACIR	22.75	91	983	883	7.7	10.5
ACSS	20.9	149	1271	1207	39.2	51.1
G(Z)TACSR	22.6	189	1416	1364	55.1	70.7

Tabella 21. Massima corrente che può transitare nella linea C con conduttori HTLS

In questo caso gli incrementi di corrente rispetto al conduttore tradizionale sono inferiori ai casi A e B. Con un conduttore ZTACIR, l'aumento in inverno sarebbe solo del 7.7%.

Si capisce subito come la tecnologia LIDAR abbinata ai sistemi GIS consenta di effettuare delle importanti valutazioni sulle linee aeree di trasmissione. Infatti la georeferenziazione cartografica delle linee, permette di valutare tutti gli attraversamenti degli elettrodotti e quindi eventuali interferenze, consentendo di calcolare la massima temperatura ammissibile dal conduttore e quindi la massima corrente.

I valori di corrente ottenuti con conduttori ad alta temperatura sono superiori a quelli trovati con conduttori tradizionali, e questo potenzialmente potrebbe fornire un migliore sfruttamento delle attuali linee elettriche aeree.



Dunque, sarebbe di notevole importanza fare in modo che le linee, sempre nel rispetto dei vincoli imposti dalla legge, possano essere sfruttate al meglio a causa delle difficoltà riscontrate nella costruzione di nuovi elettrodotti.

Tutto ciò sarebbe fondamentale, soprattutto, al fine di ridurre al minimo i vincoli nel dispacciamento della potenza, con particolare riferimento a quella prodotta da FER e di migliorare le dinamiche di formazione del prezzo nel mercato zonale siciliano.

Tuttavia, è importante considerare che:

- i conduttori ZTACIR presentano degli incrementi ridotti di corrente a fronte di notevoli investimenti economici (il costo di un conduttore ZTACIR è mediamente da quattro a cinque volte quello di un conduttore ACSR).
- i conduttore ACSS presentano buoni incrementi di corrente, ma oltre ad avere una maggiore sensibilità meccanica presentano difficoltà nell'installazione. Quindi è preferibile utilizzare questi conduttori nel caso di campate a livello e non troppo lunghe.
- i conduttori G(Z)TACSR presentano i migliori risultati in termini di incremento di corrente, ma date le difficoltà di installazione, non sono ancora presenti nelle linee italiane.

Pertanto, la scelta del tipo di conduttore ad alta temperatura da utilizzare, deve essere fatta con molta attenzione ed oculatezza, prendendo in considerazione sia le campate in cui questi verranno installati, ma anche i benefici tecnici ed economici previsti.

Questi studi, saranno utilizzati nei due capitoli successivi, dove verranno effettuate delle analisi di Power Flow, per valutare se il futuro collegamento tra la Sicilia e la Calabria porterà i benefici tecnici attesi.

## 5 Analisi di Power Flow sulla rete AT siciliana

---

Lo studio dello stato dei sistemi elettrici di potenza ha come fine la determinazione delle tensioni, in modulo e fase, dei nodi della rete, e da qui, determinare sia il flusso di potenza attiva e reattiva scambiato fra due nodi, sia le perdite di potenza attiva sulle linee che connettono i diversi punti della rete. Tale analisi, comprensiva dello studio dei metodi numerici di risoluzione delle equazioni non lineari prende il nome di load flow.

Alla base di tale indagine c'è la conoscenza delle potenze, attive e reattive, assorbite dai carichi e immesse dai generatori, o meglio di una combinazione di questi dati d'ingresso a seconda della tipologia di determinazione delle variabili scelte per il load flow. È importante, inoltre, stabilire un nodo di saldo, ovvero un nodo in cui si effettua il saldo delle potenze attive e reattive ( $P_g = P_c + \Delta P$ ,  $Q_g = Q_c + \Delta Q$ ) considerando le perdite del sistema che non sono note a priori ma solamente dopo aver trovato i flussi di potenza.

Un modello della rete elettrica siciliana è stato realizzato mediante l'utilizzo del software Neplan<sup>®</sup>. Questo programma consente di simulare le reti elettriche di potenza, e di analizzarne e di studiarne le caratteristiche.

Il software è stato utilizzato per l'implementazione del metodo di load flow sulla rete modello siciliana, ponendosi l'obiettivo di:

- determinare quali sono le criticità presenti nell'isola;
- trovare delle soluzioni per incrementare la portata in corrente degli elettrodotti che non consentono un ottimo dispacciamento di potenza attiva;
- valutare i benefici che si otterrebbero attraverso l'individuazione e l'eliminazione di queste criticità in assenza del futuro collegamento Sorgente-Rizziconi II;
- valutare i benefici che il futuro Sorgente-Rizziconi II porterà sul sistema elettrico.

## 5.1 Struttura e modello della rete elettrica di trasmissione siciliana

Il modello della rete elettrica siciliana in alta tensione, che è assimilabile alla rete reale, è stato implementato sul software Neplan<sup>®</sup>.

Attraverso questo modello, ci si pone come obiettivo, quello di fornire dei dati che possano verosimilmente descrivere l'impegno di potenza sulle linee del sistema elettrico in esame per una determinata configurazione di carico e generazione.

In questo modello, oltre alle unità produttive tradizionali, sono state inserite anche le unità di produzione facenti riferimento alla generazione da fonti rinnovabili, che per potenze superiori a 10MW sono connesse obbligatoriamente alla rete elettrica in AT.

In Figura 34 si riporta uno screenshot relativo ad uno scorcio di rete implementato su Neplan<sup>®</sup>. Le diverse colorazioni delle linee stanno ad indicare i diversi livelli di tensione presenti. Nello specifico, in rosso sono indicate le linee e le stazioni di trasformazione con primario a 380kV, in verde le linee ed i trasformatori con primario a 220kV, in magenta le linee e le stazioni di trasformazione con primario a 150kV, infine in giallo le linee a 60kV.

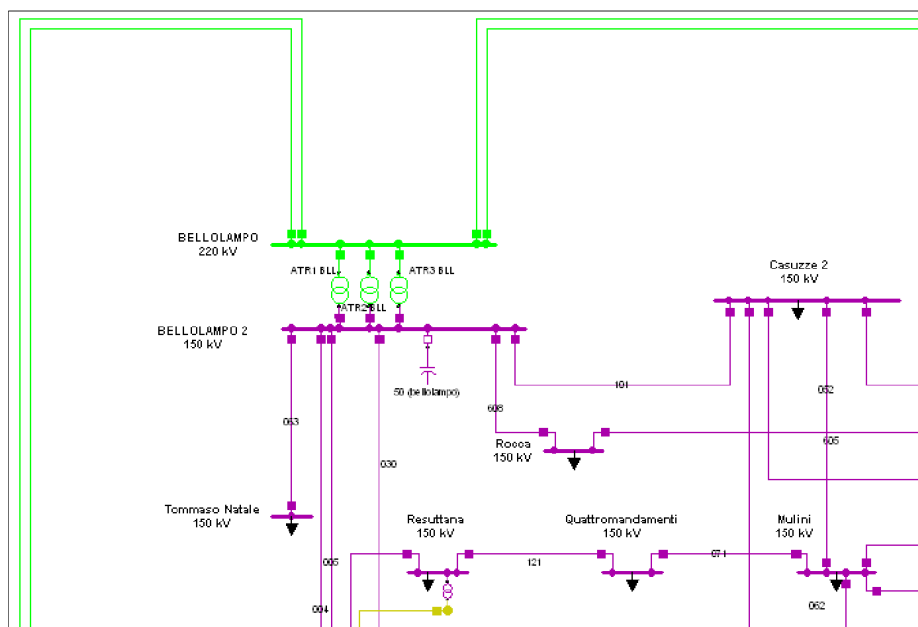


Figura 34. Screenshot struttura di rete zona di Palermo

### 5.1.1 Nodi della rete modello

La rete elettrica siciliana implementata presenta 279 nodi:

- 7 nodi hanno tensione nominale di 380kV;
- 21 nodi hanno tensione nominale di 220kV;
- 242 nodi hanno tensione nominale di 150kV;
- 9 nodi hanno tensione nominale di 60kV.

Le stazioni di trasformazione non vengono viste come singoli nodi, bensì prevedono la presenza di due nodi rappresentativi delle sbarre primarie e di quelle secondarie e naturalmente di un trasformatore.

### 5.1.2 Linee e Trasformatori presenti nella rete modello

La rete modello considerata è costituita da 324 linee. Una rappresentazione della rete è già stata fornita in Figura 1.

In Tabella 22 e Tabella 23 si riportano le caratteristiche delle linee in AT presenti nel modello.

Tensione [kV]	N° di Linee	Asset [km]
380	6	253
220	23	792
150	290	1773
60	5	30
<b>Totale</b>	<b>324</b>	<b>2848</b>

Tabella 22. Caratteristiche delle linee rete modello

Tensione [kV]	D. Conduttore [mm]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
380	31.5 trinato	585.3
220	31.5	585.3
≤150	22.8	307.7

Tabella 23. Caratteristiche conduttori delle linee aeree

Il numero dei trasformatori utilizzati nella rete modello è di 24. Di questi:

- 2 hanno rapporto di trasformazione 380/220kV/kV;
- 3 hanno rapporto di trasformazione 380/150kV/kV;
- 12 hanno rapporto di trasformazione 220/150kV/kV;

- 7 hanno rapporto di trasformazione 150/60kV/kV.

### 5.1.3 Unità produttive presenti nella rete modello

Una porzione della totale potenza generata che interessa la rete modello viene prodotta da macchine sincrone (MS). Sono presenti 66 MS: 11 generatori sincroni saranno connessi alla rete a 380kV, 15 MS alla rete a 220kV e 40 MS alla rete a 150kV.

In Tabella 24 si fa vedere come è possibile distinguere ulteriormente tali macchine in base all'origine dell'energia primaria utilizzata per produrre energia elettrica.

Fonte	Totale UP	Potenza totale installata [MVA]
Termica	49	6474.5 circa
Biomasse	1	22
Idroelettrica	16	909.8
<b>Totale</b>	<b>66</b>	<b>7406.3</b>

Tabella 24. Macchine sincrone allacciate alla rete AT siciliana

Sono invece 47 gli elementi di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili riportati nel modello, di questi 4 sono da fotovoltaico e 43 da grossi parchi eolici. Complessivamente la potenza installata da fonti rinnovabili allacciata alla rete AT è pari a circa 1600MW.

### 5.1.4 Carichi presenti nella rete modello e alimentazione da continente

I carichi presenti nella rete modello sono 167. Di questi 3 afferiscono a nodi a 220kV, 162 a nodi a 150kV e 2 a nodi a 60kV. Essi, sono principalmente di tre tipi:

- potenza, attiva e reattiva, assorbita in corrispondenza delle cabine primarie;
- potenza, attiva e reattiva, assorbita da grandi impianti industriali che non vedono la presenza di una sottostazione del gestore;
- potenza, attiva e reattiva, assorbita dalle sottostazioni elettriche ferroviarie.

Per quanto riguarda l'alimentazione dal continente al nodo di Rizziconi (RC), che è quello a cui afferisce la linea responsabile dello scambio con il resto d'Italia, sarà connesso un elemento chiamato "*alimentazione rete*". Questo permette di simulare la presenza di una rete fittizia connessa alla rete modello; in tal caso rappresenterà il

continente e tramite esso sarà possibile impostare la potenza circolante sullo scambio, in importazione o in esportazione [40].

## **5.2 Analisi di scenari in diverse condizioni di esercizio**

Si riportano di seguito i principali risultati delle simulazioni in Neplan<sup>®</sup> che mostrano come, attraverso il Sorgente - Rizziconi II, in diverse condizioni di esercizio, si possano ottenere dei benefici, quali ad esempio l'export dell'energia elettrica verso il continente senza condizioni di stress per il collegamento sottomarino.

### **5.2.1 Scenario 1: Attuale Sorgente-Rizziconi in esercizio, grossa produzione da GD ed export**

#### **5.2.1.1 Condizione Standard: export di 200MW verso il continente**

La simulazione in esame prevede la presenza di produzione di energia elettrica da fonti tradizionali e da fonti di energia rinnovabile mediante parchi eolici e grandi campi fotovoltaici.

In particolare si ha:

- Potenza attiva prodotta: 2315MW (1260MW da Pconv.+1055MW da GD);
- Potenza attiva consumata dai carichi: 2082MW
- Perdite sulle reti: 33MW

Per ottenere un export complessivo verso il continente di: 200MW.

Avendo fatto assolvere la funzione di nodo di saldo ad uno dei gruppi di generazione della centrale di Termini Imerese (Pa), in queste condizioni non si hanno particolari problemi di esercizio e non si registrano sovraccarichi sulla linee aeree di trasmissione.

In Figura 35 si mostra uno screenshot relativo alla nuova rimodulazione della zona di Sorgente, in cui è stato implementato il nuovo collegamento con il continente. Nella configurazione mostrata, tuttavia, il nuovo collegamento è fuori servizio.

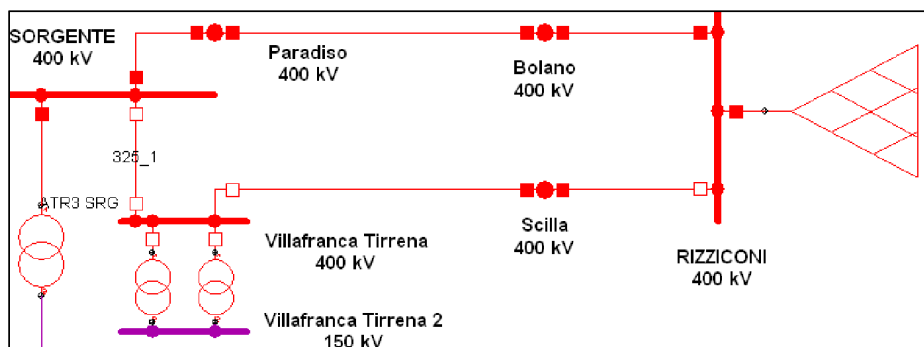


Figura 35. Screenshot su Neplan® del collegamento Sorgente-Rizziconi, con il cavo futuro non in servizio

### 5.2.1.2 Export di 600MW verso il continente

Aumentando la produzione da GD rispetto alla condizione standard del 40%, ovvero imponendo un export verso il continente di 600MW (situazione consentita solo in condizioni diurne in inverno ed in estate), e lasciando invariati i parametri relativi alla produzione da fonte tradizionale ed i carichi, si ottengono ottimi risultati, in quanto la rete risponde bene alle sollecitazioni, non producendo sovraccarichi o particolari problemi di esercizio.

### 5.2.1.3 Export di 650MW verso il continente

Imponendo un export verso il continente di 650MW (condizione attualmente non prevista da Terna S.p.A.), ottenuto aumentando la produzione da GD, e lasciando invariati i parametri relativi alla produzione da fonte tradizionale ed i carichi, si registra un sovraccarico su una linea aerea 150kV in prossimità di un centro di produzione eolica nel catanese.

### 5.2.1.4 Export di 750MW verso il continente

Imponendo un export verso il continente di 750MW (condizione attualmente non prevista da Terna S.p.A.), ottenuto aumentando la produzione da GD al proprio massimo producibile di 1600MW, e lasciando invariati i parametri relativi alla produzione da fonte tradizionale ed i carichi, si presenterebbero due sovraccarichi su linee aeree a 150kV in prossimità di centri di produzione eolica.

## 5.2.2 Scenario 2: Attuale e futuro Sorgente-Rizziconi in esercizio, grossa produzione da GD ed export

In Figura 36 si mostra uno screenshot relativo alla nuova rimodulazione della zona di Sorgente, in cui è stato implementato il nuovo collegamento con il continente, in questo caso risultante in servizio.

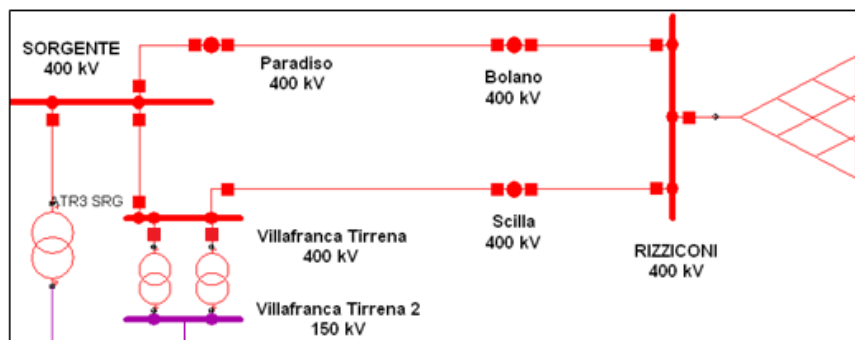


Figura 36. Screenshot su Neplan® del collegamento Sorgente-Rizziconi, con il cavo futuro in servizio

### 5.2.2.1 Condizione Standard: Export di 200MW verso il continente

Considerando le condizioni di produzione e carico del paragrafo 5.2.1.1, ed imponendo un export di 200MW, il sistema non fornisce particolari problemi di esercizio e non si registrano sovraccarichi sulle linee di trasmissione. Tuttavia il funzionamento del nuovo collegamento sarebbe pressoché nullo in quanto questo trasporterebbe solo 150MW contro i 2000MW trasportabili.

### 5.2.2.2 Export di 600MW verso il continente

Imponendo un export verso il continente di 600MW, ottenuto aumentando la produzione da GD, e lasciando invariati i parametri relativi alla produzione da fonte tradizionale ed i carichi così come da paragrafo 5.2.1.1, non si presenta nessun sovraccarico sulla rete, e si ha un' equa ripartizione delle potenze sui cavi tra Sicilia e Continente.

### 5.2.2.3 Export di 650MW verso il continente

Imponendo un export verso il continente di 650MW, ottenuto aumentando la produzione da GD, e lasciando invariati i parametri relativi alla produzione da fonte tradizionale ed i carichi così come da paragrafo 5.2.1.1, si ottengono i medesimi risultati del caso precedente, tuttavia anche in questo caso si avrebbe un sottoutilizzo



del nuovo collegamento, che lavorerebbe in export con soli 450MW contro i 2000MW potenzialmente trasportabili e nascerebbe un sovraccarico su una linea 150kV del catanese.

#### 5.2.2.4 Export di 750MW verso il continente

Imponendo un export verso il continente di 750MW (condizione attualmente non prevista da Terna), ottenuto aumentando la produzione da GD al proprio massimo producibile di 1600MW, e lasciando invariati i parametri relativi alla produzione da fonte tradizionale ed i carichi così come da paragrafo 5.2.1.1, si presenterebbe un sovraccarico su una linea 150kV in prossimità di un parco eolico e si avrebbe un sottoutilizzo del futuro collegamento sottomarino.

### 5.2.3 Confronto tra gli scenari 1 e 2

Ricordando che non è stata presa in considerazione l'ipotesi di esercizio in isola di frequenza, ed indicando con gli acronimi:

- SNC: Senza Nuovo Collegamento;
- CNC: Con Nuovo Collegamento.

Si riporta in Tabella 25 un riepilogo delle criticità trovate.

EXPORT DA GD SIMULATO	N°SOVRACC.		ZONE CON LINEE SOVRACCARICHE
	SNC	CNC	
+200MW	0	0	-
+600MW	0	0	-
+650MW	1	1	Catania
+750MW	2	1	Catania e Messina

Tabella 25. Export con continente e nuovo collegamento in servizio

Con il nuovo collegamento rimarrebbero criticità relative a sovraccarichi presenti nella zona della costa ionica, ma si otterrebbe un miglioramento delle condizioni di esercizio, in quanto i cavi, sia gli attuali, che i futuri, lavorerebbero in condizioni di funzionamento ottimali.

Questo soprattutto grazie al fatto che i flussi di potenza tra Sicilia e Calabria, si ripartirebbero equamente tra i due collegamenti, evitando sovraccarichi all'attuale cavo sottomarino.

Nei paragrafi successivi la porzione di rete tra le province di Messina e Catania verrà studiata su Neplan<sup>®</sup> ipotizzando l'uso di conduttori HTLS rispetto ai conduttori tradizionali.

### 5.2.4 Scenario 3: attuale e futuro Sorgente-Rizziconi in esercizio, carico coperto da potenza da fonte tradizionale e massimo export da GD

#### 5.2.4.1 Condizione 1: export di 1000MW verso il continente

Si è supposto di coprire tutta la potenza assorbita dai carichi e la potenza impegnata dalle perdite, attraverso l'uso delle produzione da convenzionale, supponendo che l'export sia tutto prodotto da GD.

Di seguito in Tabella 26 si riporta un riepilogo delle condizioni di input al software.

		QUANTITA' [MW]	
A	Produzione Tradizionale	2146,64	
B	Produzione da GD	1000	
C	Perdite sulla rete	64,64	C+D=2146,64MW
D	Carico	2082	
E	Export = Produzione da GD	1000	
<b>saldo = (A+B-C-D-E)</b>		<b>0</b>	

Tabella 26.  $P_{conv}=P_{carichi}+Perdite$  e  $Export=1000MW$

In queste condizioni si può notare, a valle delle simulazioni, che:

- senza futuro Sorgente-Rizziconi II in esercizio, le linee non presentano criticità, si ha export verso il continente, ma il cavo lavora in condizioni al limite della sovraccaricabilità;
- con il futuro Sorgente-Rizziconi II in esercizio, le linee non presentano sovraccarichi, e si ha l'export verso il continente facendo trasportare ad ogni terna circa 330MW.

#### 5.2.4.2 Condizione 2: export di 1600MW verso il continente

In questo caso si è supposto di coprire tutta la potenza assorbita dai carichi e la potenza impegnata dalle perdite, attraverso l'uso delle produzione da convenzionale, supponendo che l'export sia tutto prodotto da GD, ma incrementato a 1600MW. Di seguito in Tabella 27 si riporta un riepilogo delle condizioni di input al software.

		QUANTITA' [MW]	
A	Produzione Tradizionale	2198	
B	Produzione da GD	1600	
C	Perdite sulla rete	116	C+D=2198MW
D	Carico	2082	
E	Export = Produzione da GD	1600	
<b>saldo = (A+B-C-D-E)</b>		<b>0</b>	

Tabella 27.  $P_{conv}=P_{carichi}+Perdite$  e  $Export=1600MW$

In queste condizioni si può notare, a valle delle simulazioni, che:

- senza futuro Sorgente-Rizziconi II in esercizio la simulazione non è effettuabile, in quanto la potenza massima trasmissibile dal cavo sottomarino attuale è di 1000MW.
- con futuro Sorgente-Rizziconi II in funzionamento non si hanno problemi di esercizio, ma quattro linee 150kV nella zona di Messina presenterebbero sovraccarichi. Ogni terna trasporterebbe circa 530MW, sfruttando al meglio le potenzialità dei cavi.

#### **5.2.5 Scenario 4: Attuale e futuro Sorgente Rizziconi in esercizio, grossa produzione da GD ed apertura linea 380kV Sorgente - Paternò.**

Infine nell'ottica della sicurezza N-1 della rete elettrica, sono state effettuate ulteriori simulazioni considerando:

- chiusi i due collegamenti con il continente;
- aperto il collegamento a 380kV Sorgente-Paternò;
- diverse condizioni di export.

Le ipotesi assunte, sia per la generazione da fonte tradizionale, che per il carico, sono quelle date al paragrafo 5.2.1.1. In Tabella 28 si riportano i risultati ottenuti in queste condizioni di esercizio.

<b>EXPORT SIMULATO</b>	<b>N° SOVRACCARICHI</b>	<b>ZONE CON LINEE SOVRACCARICHE</b>
+200MW	1	CATANIA
+600MW	8	CATANIA E MESSINA
+650MW	10	CATANIA E MESSINA
+750MW	10	CATANIA E MESSINA

Tabella 28. Export con continente e linea 380kV Sorgente-Paternò aperta

Pertanto, come visto negli scenari presentati, grosse criticità per l'incremento della potenze sulle reti sono date dalla vetustà degli impianti, e dal fatto che in determinate condizioni di esercizio alcune linee presentano dei sovraccarichi.

Per superare queste criticità, si sono effettuate delle analisi sulla rete modello AT siciliana andando a sostituire i conduttori tradizionali con quelli ad alta capacità di trasporto, e valutando il comportamento della rete in queste condizioni. I paragrafi successivi mostrano i risultati trovati.

### **5.3 Incremento delle FER in Sicilia attraverso l'uso di conduttori HTLS**

In questo paragrafo ci si pone l'obiettivo di valutare come l'uso dei conduttori HTLS, su alcune linee a 150kV attualmente sovraccariche, garantisca un possibile incremento di export di potenza attiva verso il continente.

Rispetto a quanto descritto al paragrafo 4.2.2 questo studio mostra come in determinate condizioni di carico e produzione, i conduttori HTLS consentano un incremento di export di potenza da FER verso il continente.

Considerando inattivo il futuro collegamento con la penisola, in quanto oggetto di analisi nel prossimo capitolo, si sono seguiti i seguenti step:

1. determinazione delle condizioni di carico, di produzione e di export verso il continente, sia in inverno che in estate, ed individuazione delle linee a 150kV presenti nel territorio siciliano che costituiscono *un tappo* per l'incremento delle FER, e per l'export verso il continente;
2. scelta dei conduttori ad alta capacità di trasporto da utilizzare in sostituzione ai conduttori tradizionali attualmente installati sulle linee;

3. calcolo della nuova corrente per le linee dove si sono sostituiti i conduttori tradizionali con quelli ad alta capacità di trasporto;
4. calcolo della nuova massima potenza esportabile verso il continente, in inverno ed in estate, considerando l'uso dei conduttori HTLS.

### 5.3.1 Determinazione delle condizioni di carico e di produzione

Al fine di valutare la massima potenza attualmente esportabile, si sono definite le condizioni di carico e di potenza prodotta sia in inverno che in estate in Sicilia.

La simulazione in esame prevede la presenza di produzione di energia elettrica da fonti tradizionali e da fonti di energia rinnovabile mediante parchi eolici e grandi campi fotovoltaici.

Oggi la potenza prodotta da generazione eolica ammonta a circa 1750MW [41], la potenza prodotta da fotovoltaico è pari a 1250MW [42], ed il consumo medio nell'isola è pari a 2100MW [43].

Gli studi proposti si basano su due configurazioni di lavoro standard, relativamente a delle condizioni invernali ed estive, riportate in Tabella 29.

	<b>Configurazione Invernale</b>	<b>Configurazione Estiva</b>
Unità Tradizionali [MW]	1274.5 (SB <sup>1</sup> )	1267 (SB <sup>1</sup> )
FER [MW]	1456.5	1456.5
Consumo dei Carichi [MW]	2081.9	2481.9
Potenza Esportata [MW]	600	200
Perdite sulla rete [MW]	49.1	41.6

<sup>1</sup>SB: Slack Bus.

Tabella 29. Potenza attiva generata, assorbita ed esportata in configurazioni invernali ed estive standard

Le correnti utilizzate da Terna per esercire le linee a 150kV sono generalmente:

- 300A in estate;
- 500A in inverno.

Questi valori di corrente sono stati implementati su Neplan<sup>®</sup>.

A valle delle simulazioni con le condizioni di generazione, carico ed export riportati in Tabella 29, è stato trovato che il sistema elettrico mostra diverse linee a 150kV in sovraccarico. Le linee a 220kV e 380kV non presentano criticità.

### 5.3.2 Scelta dei conduttori HTLS, e determinazione della massima freccia per linee aeree a 150kV

I conduttori ACSR delle linee sovraccariche, sono stati sostituiti nel modello di rete con i conduttori HTLS descritti al paragrafo 4.2.2.1.

Come detto, questi conduttori presentano caratteristiche simili ai conduttori tradizionali, ma hanno un coefficiente di espansione lineare più basso. Pertanto a parità di freccia possono accettare temperature più alte, e conseguentemente possono far transitare correnti più elevate.

Al fine di verificare il D.M. n°449 del 1988, e considerato che le linee siciliane sono prevalentemente in zona A [44], la massima temperatura ammissibile per i conduttori è stata fissata in 55°C. In Figura 37 si riporta la relazione tra freccia e temperatura per ogni tipologia di conduttore HTLS preso in considerazione, avendo supposto una campata media di 350m ed una linea con campate a livello.

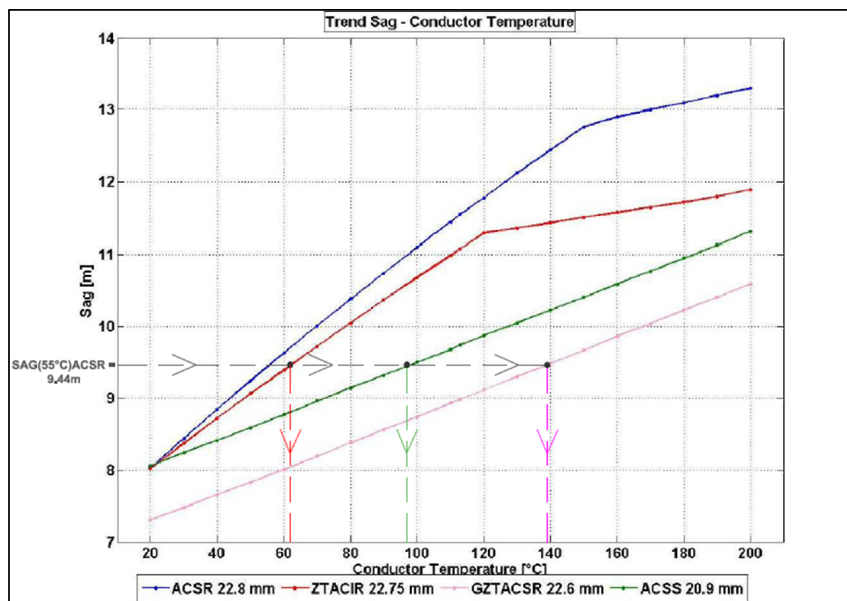


Figura 37. Relazione tra freccia e temperatura

Per interpolazione grafica si ricavano i valori di temperatura che possono assumere i conduttori HTLS a parità di freccia.

In queste condizioni non sorgono diminuzioni di franco elettrico, tali da creare possibili interferenze con le opere sottostanti. Tabella 30 riepiloga quanto descritto precedentemente.

<b>T<sub>Max</sub> ACSR</b> <b>22.8mm</b> <b>[°C]</b>	<b>F[m]</b>	<b>T<sub>c</sub> ZTACIR</b> <b>22.75 mm [°C]</b>	<b>T<sub>c</sub> ACSS</b> <b>20.9 mm [°C]</b>	<b>T<sub>c</sub> G(Z)TACSR</b> <b>22.6 mm [°C]</b>
55	9.44	62	97	138

Tabella 30. Confronto freccia-temperatura tra conduttori tradizionali ed HTLS

### 5.3.3 Calcolo della nuova corrente per le linee dove si sono sostituiti i conduttori tradizionali con quelli ad alta capacità di trasporto

Il calcolo delle nuove correnti per ogni tipologia di conduttore HTLS, da sostituire su Neplan<sup>®</sup> ai valori di corrente iniziali, è stato effettuato con il modello matematico di Schurig and Frick, già descritto in 4.2.1.2.

Da questa formula si risale al massimo valore di corrente che può circolare sulla linea in determinate condizioni climatiche.

Considerato che le linee sovraccariche, trovate a valle delle simulazioni, si trovano in zone differenti della Sicilia, per trovare i valori di corrente da utilizzare nel modello di Neplan<sup>®</sup>, l'isola è stata suddivisa climaticamente in Sud, Est, Nord-Est e Nord-Ovest.

Le condizioni climatiche assunte sono state trovate considerando la serie storica degli ultimi dieci anni delle stazioni metereologiche di Agrigento, Catania, Messina e Palermo, che si trovano rispettivamente a Sud, Est, Nord Est e Nord Ovest della Sicilia. Tabella 31, Tabella 32, Tabella 33 e Tabella 34 riportano le condizioni climatiche considerate.

	<b>Inverno</b>	<b>Estate</b>
Temperatura Ambiente [C°]	18	29
Temperatura Conduttore [C°]	55	55
Velocità del vento [km/h]	10	10
Coefficiente di irraggiamento solare [W/m <sup>2</sup> ]	1029.49	1029.49
Coefficiente ε di emissività del conduttore	0.5	0.5
Condizioni del cielo	Pulito	Pulito
Irraggiamento	Si	Si

Tabella 31. Condizioni climatiche Sud Sicilia

	<b>Inverno</b>	<b>Estate</b>
Temperatura Ambiente [C°]	20	33
Temperatura Conduttore [C°]	55	55
Velocità del vento [km/h]	6	7
Coefficiente di irraggiamento solare [W/m <sup>2</sup> ]	1029.49	1029.49
Coefficiente ε di emissività del conduttore	0.5	0.5
Condizioni del cielo	Pulito	Pulito
Irraggiamento	Si	Si

Tabella 32. Condizioni climatiche Est Sicilia

	<b>Inverno</b>	<b>Estate</b>
Temperatura Ambiente [C°]	19	33
Temperatura Conduttore [C°]	55	55
Velocità del vento [km/h]	8	9
Coefficiente di irraggiamento solare [W/m <sup>2</sup> ]	1029.49	1029.49
Coefficiente ε di emissività del conduttore	0.5	0.5
Condizioni del cielo	Pulito	Pulito
Irraggiamento	Si	Si

Tabella 33. Condizioni climatiche Nord-Est Sicilia

	<b>Inverno</b>	<b>Estate</b>
Temperatura Ambiente [C°]	19	31
Temperatura Conduttore [C°]	55	55
Velocità del vento [km/h]	9	8
Coefficiente di irraggiamento solare [W/ m <sup>2</sup> ]	1029.49	1029.49
Coefficiente ε di emissività del conduttore	0.5	0.5
Condizioni del cielo	Pulito	Pulito
Irraggiamento	Si	Si

Tabella 34. Condizioni climatiche Nord-Ovest Sicilia

Tabella 35, Tabella 36, Tabella 37 e Tabella 38 riassumono le correnti trovate.



<b>ZONA A: Sud Sicilia</b>			<b>Massima corrente consentita [A]</b>		<b>Incremento % rispetto al 22.8mm</b>	
<i>Tipo</i>	<i>D. [mm]</i>	<i>T<sub>c</sub> [°C]</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>
ACSR	22.8	55	500	300	-	-
ZTACIR	22.75	62	870	740	74	147
ACSS	20.9	97	1139	1054	128	251
G(Z)TACSR	22.6	138	1356	1293	171	331

Tabella 35. Massima corrente che può transitare nel Sud della Sicilia con i conduttori HTLS

<b>ZONA B: Est Sicilia</b>			<b>Massima corrente consentita [A]</b>		<b>Incremento % rispetto al 22.8mm</b>	
<i>Tipo</i>	<i>D. [mm]</i>	<i>T<sub>c</sub> [°C]</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>
ACSR	22.8	55	500	300	-	-
ZTACIR	22.75	62	766	643	53	114
ACSS	20.9	97	1023	963	105	221
G(Z)TACSR	22.6	138	1230	1200	146	300

Tabella 36. Massima corrente che può transitare nell' Est della Sicilia con i conduttori HTLS

<b>ZONA C: Nord-Est Sicilia</b>			<b>Massima corrente consentita [A]</b>		<b>Incremento % rispetto al 22.8mm</b>	
<i>Tipo</i>	<i>D. [mm]</i>	<i>T<sub>c</sub> [°C]</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>
ACSR	22.8	55	500	300	-	-
ZTACIR	22.75	62	834	687	67	129
ACSS	20.9	97	1101	1021	120	240
G(Z)TACSR	22.6	138	1315	1269	163	323

Tabella 37. Massima corrente che può transitare nel Nord-Est della Sicilia con i conduttori HTLS

<b>ZONA D: Nord-Ovest Sicilia</b>			<b>Massima corrente consentita [A]</b>		<b>Incremento % rispetto al 22.8mm</b>	
<i>Tipo</i>	<i>D. [mm]</i>	<i>T<sub>c</sub> [°C]</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>
ACSR	22.8	55	500	300	-	-
ZTACIR	22.75	62	859	692	72	131
ACSS	20.9	97	1132	1009	126	236
G(Z)TACSR	22.6	138	1350	1248	170	316

Tabella 38. Massima corrente che può transitare nel Nord-Ovest della Sicilia con i conduttori HTLS

É rilevante notare i grandi incrementi di corrente ottenuti con i conduttori HTLS. In estate questi ammontano mediamente al 130% per lo ZTACIR, 240% per l' ACSS, ed al 315% per il G(Z)TACSR. In inverno invece queste ammontano al 66% per lo ZTACIR, 120% per l' ACSS, ed al 162% per il G(Z)TACSR.

### 5.3.4 Calcolo della nuova massima potenza esportabile con i conduttori HTLS

La Tabella 39 mostra il riepilogo dei risultati ottenuti su Neplan<sup>®</sup> dopo aver sostituito, per le linee oggetto di sovraccarichi, i valori di corrente iniziali con quelli ricavati attraverso il modello matematico di Schurig and Frick [45].

Conduttori		Massimo export consentito [MW]		Incremento % ottenuto con i conduttori HTLS	
<i>Tipo</i>	<i>Diametro [mm]</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>
ACSR	22.8	600	200	-	-
ZTACIR	22.75	1000	600	66.67	200
ACSS	20.9	1000	1000	66.67	400
G(Z)TACSR	22.6	1000	1000	66.67	400

Tabella 39. Massimo export di potenza attiva verso il continente

Durante l'estate l'incremento della potenza attiva verso il continente, ottenuta con gli ACSS ed i G(Z)TACSR, sarebbe del 400%, invece con i ZTACIR sarebbe del 200%.

Sostituendo i conduttori tradizionali con quelli HTLS si potrebbe garantire in inverno un incremento percentuale del 66.67% rispetto alle attuali potenze esportate.

Il limite di 1000MW è definito dalla massima capacità del cavo sottomarino che attualmente collega la Sicilia con la Calabria.

Pertanto, l'uso di questi conduttori consentirebbe di incrementare la potenza in export verso il continente, e di migliorare gli attuali asset presenti in Sicilia, oltre ovviamente a migliorare la stabilità e la sicurezza del sistema elettrico siciliano.

## **6 La Sicilia come hub elettrico nel mediterraneo**

---

Considerata la posizione strategica della Sicilia all'interno del mediterraneo, ed in vista di un unico mercato elettrico europeo, le interconnessioni tra i vari paesi stanno assumendo una grandissima importanza.

La possibilità di trasferire attraverso la Sicilia grandi quantitativi di potenza attiva generata da FER dal Nord Africa verso il Nord Europa rappresenta una sfida di assoluto prestigio per gli organi di governo nazionali ed europei [46][47].

Questo capitolo mostra come l'impatto della produzione di energia elettrica dal Nord Africa verso il sistema elettrico italiano possa essere rilevante, e come gli scambi di potenza tendano a seguire la direzione da Sud a Nord.

Partendo dalle condizioni della rete al 2015, prima si proietteranno tutte le condizioni della rete elettrica siciliana al 2020, considerando attivi tutti i collegamenti che sono attualmente solo in fase di scheduling, dopodiché si valuterà come in futuro potrebbe comportarsi il sistema elettrico siciliano in questo contesto.

Infine, verrà mostrato come la Sicilia da qui a qualche anno, potrebbe ritrovarsi ad essere uno tra i più grandi hub energetici d'Europa. In quest'ottica si inserisce l'importanza del futuro collegamento tra la Sicilia e la Calabria [48]-[51].

### **6.1 Rete elettrica mediterranea al 2015**

Al fine di raggiungere i tre principali obiettivi dell'Unione Europea sulla politica energetica (competitività del sistema, sostenibilità ambientale e sicurezza dell'approvvigionamento energetico), l'integrazione elettrica della regione euro-mediterranea rappresenta una priorità importante.

Nell'ambito degli obiettivi di sostenibilità della strategia UE 2020 e 2050 [52][53], particolare attenzione è rivolta ai paesi del cosiddetto MENA (Medio Oriente e Nord Africa), che si trovano all'interno del Mediterraneo e presentano un significativo potenziale di produzione di energia elettrica da RES. Questo è stato il principale fattore scatenante del lancio del MSP da parte dell'Unione Europea nel 2008.

Il successo del progetto [54][55] dipende dalla capacità della rete di trasmissione europea ad ospitare le massicce iniezioni di potenza.

In questo contesto, il ruolo chiave dell'Italia emerge con chiarezza. Infatti, le zone di iniezione geograficamente più vicine per l'importazione di energia (Sicilia e Sardegna) sono entrambe collegate alla terraferma.

Per le considerazioni sopra descritte, e grazie alla strategica posizione geografica, la Sicilia potrebbe diventare molto presto un importante hub energetico nel Mediterraneo.

### **6.1.1 Le attuali interconnessioni presenti nel mediterraneo**

Un discreto numero di interconnessioni attualmente insistono nel mar Mediterraneo. A meno di una eccezione, tutte le interconnessioni sfruttano la tecnologia HVDC. Questo è dovuto al fatto che i sistemi HVDC sono più affidabili rispetto agli HVAC, soprattutto quando si hanno collegamenti sottomarini con lunghezze superiori a 50km [56]-[59].

Il collegamento più vecchio presente nel mediterraneo è il SACOI. Questo, commissionato nel 1965, ha una potenza massima trasmissibile pari a 300MW, ed è esercito a  $\pm 200$ kV[60]-[62].

Un'altra interconnessione molto importante è tra il Marocco e la Spagna. Questa è in esercizio in HVAC con una doppia terna da 700MVA a 400kV.

Gli ultimi schemi di trasmissione utilizzati nel mar Mediterraneo sono tutti in HVDC. "GRITA" che collega l'Italia alla Grecia (500 MW/ $\pm$  400 kV) [63]-[66], il "SAPEI" tra Italia e Sardegna (2x500MW/ $\pm$  500 kV) [67], e "Romulo" tra la terraferma spagnola e l'isola di Maiorca (400 MW/ $\pm$  250 kV) [68][69].

### **6.1.2 La rete elettrica di trasmissione siciliana al 2015 ed export verso il continente**

La rete elettrica AT siciliana è stata già ampiamente descritta nei capitoli precedenti. Rispetto a quanto già scritto, l'unica novità è rappresentata dal nuovo collegamento con l'isola di Malta. La nuova interconnessione con Malta è in HVAC con tensione nominale di 220kV[70].

Un collegamento sottomarino collega la stazione di Marina di Ragusa, in Sicilia, e Maghtab a Malta. Questa nuova interconnessione migliora la stabilità e l'efficienza del sistema elettrico maltese, e riduce l'uso delle due UP termoelettriche presenti nella piccola isola.

La linea a 220kV parte dalla stazione elettrica di Ragusa. La prima parte del collegamento è in cavo terrestre lungo 19km fino a Marina di Ragusa(RG), da qui attraverso i giunti terra-mare si diparte il tratto sottomarino, lungo circa 98km. L'arrivo a Malta è presso la stazione elettrica 220kV/133kV di Maghtab.

Nelle simulazioni (svolte ad Aprile 2015) si sono considerati attivi sia il nuovo collegamento Sicilia-Calabria 380kV HVAC in doppia terna da 2000MW, che il collegamento Sicilia-Malta 220kV HVAC da 200MW. Mentre il primo sarà in realtà attivo dal 2016, il secondo è già in esercizio, e collega la Sicilia all'isola del mediterraneo.

Una prima simulazione di load flow è stata effettuata su Neplan<sup>®</sup>, per valutare in determinate condizioni di esercizio, quanto vale l'export verso il continente.

Per fare ciò, tutti i nodi di generazione sono stati settati come “*nodi PV*”, tutti i nodi di carico come “*nodi PQ*”. In questo modo lo “*Slack Bus*” sarà il collegamento con il continente, ed il software assegnerà a questo elemento il valore della potenza trasmessa dalla Sicilia verso la Calabria.

Si sono assunte delle condizioni di carico e generazione standard, ed un export verso Malta di 145MW. In Tabella 40 i dati della simulazione implementata.

	<b>Configurazione Standard</b>
Unità Tradizionali [MW]	1300
Produzione da FER [MW]	1200
Carichi [MW]	2100
Potenza esportata verso Malta [MW]	145
Perdite sulla rete [MW]	43.4
Potenza esportata verso il Continente [MW]	211.6(SB <sup>1</sup> )

<sup>1</sup>SB: Slack Bus

Tabella 40. Configurazione standard di potenza generata, assorbita, esportata nel 2015

In questo caso risulta che la potenza esportata verso il continente è pari a 211.6MW.

## 6.2 Condizioni di Import-Export all'interno della rete AT Euro-Mediterranea

### 6.2.1 Rete elettrica siciliana al 2020

Da qui al 2020 si attendono diversi macro-interventi da parte di Terna in Sicilia [71]. La Figura 38 mostra come da qui a qualche anno cambierà la rete nell'isola.

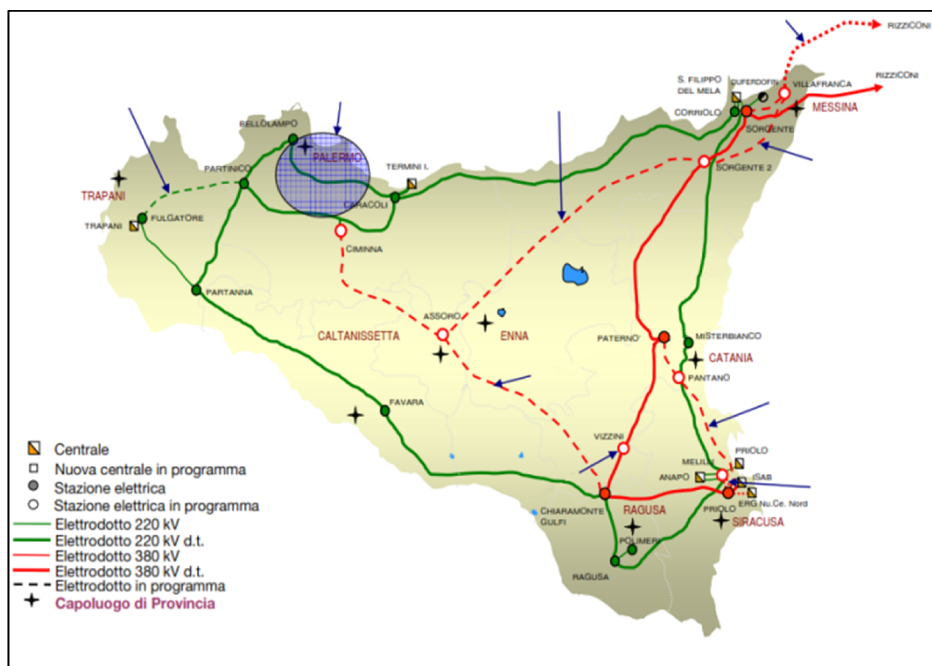


Figura 38. Rete elettrica siciliana a 220kV e 380kV nel 2020

Gli interventi in Sicilia riguarderanno sia la rete a 220kV che quella a 380kV, nello specifico:

- stazione elettrica di Ciminna (PA) 380kV/220kV;
- stazione elettrica di Melilli (PA) 380kV/220kV;
- stazione elettrica di Assoro (EN) 380kV/150kV;
- stazione elettrica di Vizzini (CT) 380kV/150kV;
- stazione elettrica di Pantano (CT) 380kV/150kV;
- stazione elettrica di Sorgente 2 (ME) 380kV/150kV;
- linea Chiaramonte Gulfi- Ciminna a 380kV;
- linea Sorgente 2-Assoro a 380kV;

- linea Sorgente 2-Villafranca a 380kV;
- linea Paternò-Pantano-Priolo a 380kV;
- linea Melilli-Priolo a 380kV;
- linea Partinico- Fulgatore a 220kV;
- riordino dell'area metropolitana di Palermo.

## 6.2.2 Rete elettrica mediterranea al 2020

Lo scenario della rete mediterranea al 2020 è caratterizzato da due nuove interconnessioni con il Nord Africa, una con la Tunisia, ed una con la Libia. Il primo collegamento è già stato pianificato e progettato, il secondo è sotto analisi tecnica.

Il collegamento tra la Tunisia e l'Italia (via Sicilia) è in HVDC (400kVcc). Lungo 200km con massima potenza trasmissibile pari a 1000MW; arriverà nel lato italiano presso la stazione elettrica 220kV/150kV di Partanna (TP).

Il collegamento tra la Libia e la Sicilia in HVDC (500kVcc) presenterà un cavo sottomarino lungo 550km, con massima potenza trasmissibile pari a 1000MW, attestandosi nel lato siculo presso la stazione elettrica di Chiaramonte Gulfi (RG).

Infine, sempre entro il 2020 è previsto un ulteriore collegamento sottomarino HVAC tra la Sicilia e Malta al fine di creare una connessione in doppia terna. Non appena anche questo collegamento entrerà in esercizio, la massima potenza trasmissibile verso Malta sarà pari a 400MW [72].

In Tabella 41 sono riportati i principali collegamenti previsti.

Direzione	Da	A	Cavo	V [kV]	Capacità [MW]	Condizione di lavoro [MW]
EXPORT	Sicilia	Continente	HVAC	380	3000	SB <sup>1</sup>
	Sicilia	Malta	HVAC	220	400	300
IMPORT	Tunisia	Sicilia	HVDC	400	1000	800
	Libia	Sicilia	HVDC	500	1000	800

<sup>1</sup>SB: Slack Bus

Tabella 41. Interconnessioni con la Sicilia al 2020

### 6.2.3 Condizioni di carico, generazione ed export al 2020, e scenari proposti

Il miglioramento previsto con le interconnessioni attraverso la Sicilia verso il Nord Italia e l'Europa continentale consentirà nuove condizioni di funzionamento del sistema elettrico di trasmissione di Sicilia, soprattutto in termini di import ed export della potenza.

Le nuove interconnessioni con il Nord Africa, quando entreranno a regime, consentiranno la copertura del fabbisogno siciliano ed un export verso il nord Europa attraverso la nuova linea Sorgente-Rizziconi II. Inoltre sarà possibile esportare fino a 400MW verso Malta.

In questo paragrafo si definiscono le condizioni di esercizio assunte, al fine di valutare la possibile potenza esportabile verso il continente, in diverse configurazioni di lavoro.

La produzione da FER è stata proiettata al 2020 [73]. Gli studi sulla produzione di energia elettrica da FER usualmente, vista l'imprevedibilità delle fonti, utilizzano approcci probabilistici; in questo studio invece, è stato utilizzato un approccio deterministico. L'ufficio di statistica di Terna assume due tassi di crescita per le rinnovabili: il 2.1% per gli anni 2014-2016, ed il 2.5% per gli anni 2016-2020. Tuttavia, considerando anche la non simultaneità della produzione, soprattutto quella da fotovoltaico, la potenza generata da FER è stata assunta è pari a 2000MW.

Per quanto riguarda invece i carichi, considerato che negli ultimi cinque anni il carico medio si è attestato intorno a 2100MW, e che siamo in presenza di una lieve ripresa, è stato stimato un carico medio di 2300MW.

Quindi, in conclusione, i dati di configurazione implementati su Neplan<sup>®</sup> per il 2020, sono quelli riportati in Tabella 42.

	<b>Condizioni di lavoro [MW]</b>
Unità Tradizionali [MW]	1300
Produzione da FER [MW]	2000
Carichi [MW]	2300
Sistemi di pompaggio [MW]	290

Tabella 42. Condizioni di lavoro, di generazione e carico, per le simulazioni proposte al 2020



#### 6.2.4 Scenari simulati al 2020

Le simulazioni effettuate sono caratterizzate dallo stesso valore di export verso Malta, dalla stessa produzione di potenza da FER ed impianti tradizionali, e dagli stessi valori di carico.

I dati riguardanti la potenza in import verso l'Italia, sono quelli già presentati in Tabella 41. La rete di trasmissione siciliana al 2020 descritta in 6.2.1 è stata implementata su Neplan<sup>®</sup>. La produzione ed i carichi sono quelli descritti in Tabella 42; i dati relativi ad import ed export di potenza sono stati fissati considerando i valori nominali delle interconnessioni, e secondo criteri di sicurezza ed affidabilità.

Ricapitolando, le simulazioni della rete al 2020 presentano tre scenari:

- a. pessimistico: nessun import di potenza attiva dal Nord Africa;
- b. standard: import di potenza attiva dalla sola Tunisia;
- c. ottimistico: import di potenza attiva dalla Tunisia e dalla Libia.

Per tutti e tre gli scenari sono stati fissati 300MW di export verso Malta.

### 6.3 Risultati

In questo paragrafo verranno mostrati i risultati delle tre simulazioni. L'obiettivo è valutare il possibile export di potenza attiva verso il continente, quando tutti i dati inerenti carico, generazione ed import sono imposti.

Tutti i nodi di generazione sono stati settati come “*nodi PV*”, tutti i nodi di carico come “*nodi PQ*”. In questo modo lo Slack Bus sarà il collegamento con il continente, ed il software assegnerà a questo elemento il valore della potenza trasmessa dalla Sicilia verso la Calabria.

Lo scenario pessimistico non prevede import di potenza attiva dal Nord Africa. In questo caso l'unico export di potenza è dalla Sicilia verso Malta per complessivi 300MW. L'export verso il continente, a seguito di analisi di power flow effettuata con Neplan<sup>®</sup>, risulta essere pari a 343MW.

Nello scenario standard, si propone un import dalla Tunisia verso l'Italia per complessivi 800MW. L'export verso Malta è sempre fissato in 300MW. In queste condizioni l'export verso il continente è stato determinato in 1094MW.

Infine, nello scenario ottimistico, si sono considerate attive entrambe le interconnessioni con Libia e Tunisia. Fissando l'import in 800MW a collegamento, e l'export a 300MW verso Malta, risulta una potenza verso il continente pari a 1865MW.

Tabella 43 e Tabella 44 riportano i risultati delle simulazioni.

Direzione	Da	Verso	Scenario Pessimistico	Scenario Standard	Scenario Ottimistico
EXPORT [MW]	Sicilia	Continente	342.77	1094.07	1864.59
	Sicilia	Malta	300	300	300
IMPORT [MW]	Tunisia	Sicilia	0	800	800
	Libia	Sicilia	0	0	800

Tabella 43. Risultati delle simulazioni

	Da	Verso	2015	Scenari al 2020		
				Pessimistico	Standard	Ottimistico
Export [MW]	Sicilia	Continente	211.59	342.77	1094.07	1864.59
Incremento %			-	61.99	417.07	781.23

Tabella 44. Incremento percentuale di potenza attiva verso il Continente al 2020 rispetto al 2015

Al 2020 gli incrementi percentuali di potenza attiva dalla Sicilia verso il continente, rispetto al 2015, sono molto alti. Nello specifico ammontano al 61.85% nello scenario pessimistico, al 416.95% per lo scenario standard, ed al 781.10% per lo scenario ottimistico.

## 6.4 Considerazioni sulle tensioni ai nodi

Al fine di rendere lo studio più completo, vengono effettuate, infine, alcune considerazioni sulle tensioni ai nodi del sistema nei diversi scenari proposti.

Il calcolo del load flow consente di valutare il profilo delle tensioni in modulo e fase ai nodi. Nelle simulazioni proposte, la tensione al nodo Slack Bus, chiamato "Rizziconi" è stata fissata al 110% del valore nominale.

Negli studi effettuati, non si presentano deviazioni di tensione rilevanti rispetto al valore nominale; i soli cinque nodi che presentano piccole variazioni di tensione sono elettricamente vicini al nodo Slack Bus e sono gli stessi per ogni scenario.

La Tabella 45 fa vedere il valore percentuale della tensione ai nodi che violano il limite del 110% del valore nominale sia per lo scenario al 2015, che per quelli al 2020.

Il grafico di Figura 39 mostra, invece, il valore percentuale di tensione per ogni nodo del sistema rispetto al valore nominale. In questo modo è possibile riscontrare come la tensione in ogni nodo, per ogni scenario al 2020, è quasi sempre compresa tra il 95% ed il 105% del valore nominale.

Nodi	V [kV]	2015	2020		
		<i>Vn [%]</i>	<i>Pessimistico Vn [%]</i>	<i>Standard Vn [%]</i>	<i>Ottimistico Vn [%]</i>
Bolano	380	111,40	111,02	110,89	110,74
Paradiso	380	111,42	111,02	110,91	110,78
Scilla	380	114,17	113,12	112,98	112,75
Sorgente	380	111,09	110,35	110,28	110,10
Villafranca Tirrena	380	113,99	112,72	112,67	112,52

Tabella 45. Valore percentuale della tensione ai nodi che presentano violazioni rispetto al valore nominale per ogni scenario

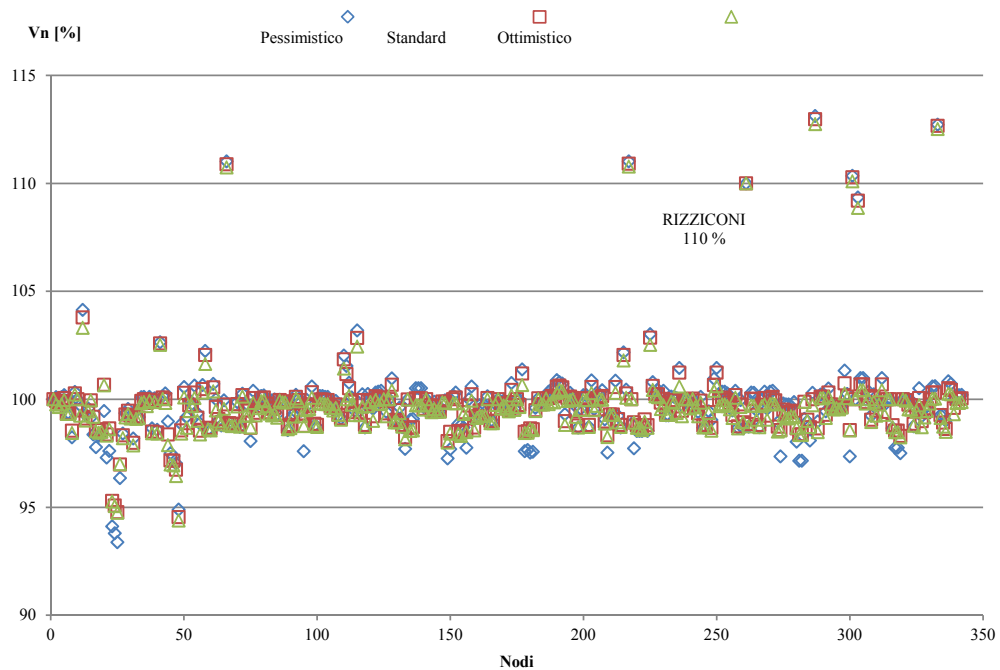


Figura 39. Valore percentuale di tensione rispetto al valore nominale per ogni nodo del sistema elettrico nei tre scenari al 2020

## **7 Valutazione dei campi magnetici ed uso di tecniche di mitigazione in relazione al Sorgente-Rizziconi II**

---

Tra le varie criticità che un collegamento in alta tensione può comportare, vi è sicuramente l'aspetto relativo agli effetti prodotti dai campi magnetici. L'impatto ambientale delle linee aeree ed in cavo in alta tensione all'interno di contesti urbani e territoriali, infatti, rappresenta un argomento importante nell'ambito dei sistemi di potenza.

Non è stato possibile effettuare studi sui campi magnetici prodotti dal futuro collegamento a 380kV in quanto si tratta di dati riservati. Tuttavia, considerato che il progetto è stato autorizzato da tutti gli organi competenti si presuppone che questo verifichi tutte le normative vigenti.

Si è visto nei paragrafi precedenti che il potenziamento della rete passa attraverso un incremento delle correnti sulle linee a 150kV. Al fine di valutare gli effetti sull'ambiente e sulla popolazione, sono stati effettuati delle analisi sui campi magnetici prodotti da una linea aerea a 150kV e da una linea in cavo a 380kV.

Per entrambi i casi, metodi di mitigazione sono stati implementati ed applicati. Questi studi sono stati svolti con un software CESI in ambiente LabVIEW denominato EMF Tool.

### **7.1 Mitigazione del campo magnetico prodotto da una linea aerea a 150kV**

L'interesse verso i campi magnetici a bassa frequenza, dovuto alle linee in alta tensione, ha assunto notevole rilevanza negli ultimi anni, generando diverse iniziative politiche ed attività di ricerca. In particolare, sulla base di alcuni studi epidemiologici che hanno evidenziato la correlazione tra l'esposizione ai campi magnetici, e la formazione di alcune malattie, le autorità hanno sviluppato un

approccio precauzionale, con l'obiettivo di ridurre, laddove possibile, l'esposizione umana ai campi magnetici prodotti da elettrodotti [74]-[80].

La legge italiana[81][82] definisce i limiti di esposizione dai campi magnetici in:

- *Limite di esposizione* (100 $\mu$ T) per la protezione dai possibili effetti a breve termine;
- *Valore di attenzione* (10 $\mu$ T) ed *obiettivo di qualità* (3 $\mu$ T), per la protezione da possibili effetti a lungo termine connessi all'esposizione nelle aree di gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenza non inferiore a 4 ore giornaliere (luoghi tutelati).

Il valore di attenzione si riferisce ai luoghi tutelati esistenti nei pressi di elettrodotti esistenti; l'obiettivo di qualità si riferisce, invece, alla progettazione di nuovi elettrodotti in prossimità di luoghi tutelati esistenti o alla progettazione di nuovi luoghi tutelati nei pressi di elettrodotti esistenti.

Pertanto, la valutazione dei campi magnetici in prossimità delle linee aeree diventa di rilevante interesse, anche al fine di sviluppare tecniche di mitigazione che consentano di ridurre i loro effetti sull'ambiente circostante e sulla popolazione.

Dopo aver presentato alcune tecniche di mitigazione presenti in letteratura, al fine di trovare la soluzione migliore, verranno effettuati degli studi e delle applicazioni su una linea aerea a 150kV.

### **7.1.1 Calcolo dell'induzione magnetica**

Alla frequenza di esercizio, il calcolo del campo magnetico può essere studiato come un problema quasi statico.

La procedura che sarà adottata è quella descritta in [83][84], ovvero quella suggerita dal Comitato Elettrotecnico Italiano per il calcolo del campo magnetico prodotto da una linea aerea.

Al fine di valutare l'induzione magnetica prodotta da ogni conduttore è stata utilizzata la legge di Biot-Savart, ed applicato il principio della sovrapposizione degli effetti. Di seguito si riportano le assunzioni fatte:

1. il sistema trifase è stato supposto simmetrico ed equilibrato;

2. sono state trascurate le correnti indotte sugli elementi conduttivi prossimi agli elettrodotti;
3. l'effetto delle armoniche delle correnti è stato trascurato;
4. i conduttori aerei sono stati considerati rettilinei, orizzontali ed infinitamente lunghi. In queste condizioni è possibile effettuare una rappresentazione 2D del sistema.

La Figura 40 mostra la schematizzazione di una generica linea aerea di trasmissione, per determinare i fasori delle componenti spaziali per il calcolo del campo magnetico.

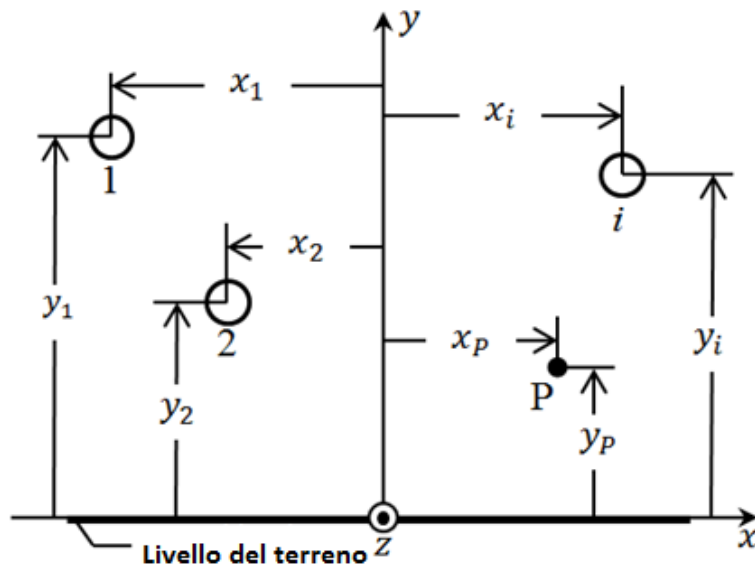


Figura 40. Schematizzazione di una linea di trasmissione per determinare i fasori delle componenti spaziali per il calcolo del campo magnetico

L'algoritmo considerato, con riferimento alla Figura 40, consiste nei seguenti step:

- a) Le correnti sinusoidali in ognuno degli  $n$  conduttori vengono rappresentati mediante fasori. Sia  $I_i$  il fasore della corrente che fluisce nell' $i$ -esimo conduttore con ampiezza  $I_i$ .
- b) Con riferimento ad un generico punto di riferimento P, di coordinate  $(x_p, y_p)$  i fasori  $B_x$  e  $B_y$  ( $B_z$  è zero ovunque), i quali sono associati alle tre componenti di flusso di campo magnetico non mitigato  $\vec{B}$ , possono essere calcolati dalle seguenti equazioni:

$$B_x(x_P, y_P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i^n I_i \frac{y_i - y_P}{(x_P - x_i)^2 + (y_P - y_i)^2} \quad (7.1)$$

$$B_y(x_P, y_P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i^n I_i \frac{x_P - x_i}{(x_P - x_i)^2 + (y_P - y_i)^2} \quad (7.2)$$

Dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica nel vuoto. Queste equazioni sono valide anche per linee in DT, purché appositi fasori della corrente siano introdotti per rappresentare la corretta disposizione delle fasi. Il campo magnetico complessivo, non mitigato, è valutato quindi attraverso:

$$B(x_P, y_P) = \sqrt{B_x^2(x_P, y_P) + B_y^2(x_P, y_P)} \quad (7.3)$$

## 7.1.2 Metodi di mitigazione del campo magnetico per linee aeree di trasmissione

La riduzione dei campi ELF può essere ottenuta attraverso diverse tecniche, quali il ri-arrangiamento delle fasi, o l'applicazione di schermi.

I principali metodi di riduzione del campo magnetico prodotto da linee aeree di trasmissione sono:

- ri-arrangiamento dei conduttori di fasi (traslazione delle fasi);
- uso di circuiti passivi, denominati loops.

### 7.1.2.1 Ri-arrangiamento delle fasi

Oltre alle correnti di fase, il campo magnetico prodotto da una linea di trasmissione dipende dalla distanza tra i conduttori, dalla distanza tra le fasi e dalla geometria della linea.

Come mostrato in [85]-[87] una riduzione significativa del campo magnetico può essere ottenuta agendo sulla variazione della distanza tra i conduttori.

Per una linea in semplice terna, tuttavia, le proprietà meccaniche della linea, l'effetto corona e la manutenzione degli impianti sono aspetti da tenere in considerazione.

Per una linea in DT, la direzione della corrente in ognuna delle terne gioca un ruolo fondamentale. Pertanto la scelta della traslazione delle fasi deve essere fatta in modo da ottenere la riduzione maggiore all'esposizione [88]-[90].

Un'altra soluzione per le linee in DT consiste nello “*splittamento*” delle fasi. Una linea “*split-phase*” è sempre una linea trifase dove uno o più fasi vengono divise in due o più conduttori. In questo modo la divisione della corrente nei conduttori garantirà una riduzione del campo magnetico. Con riferimento ad una linea a 380kV, attraverso l'utilizzo del metodo split-phase, è possibile ottenere una riduzione fino al 60-70% del campo magnetico rispetto al valore iniziale. Tuttavia, rispetto ad una linea tradizionale, questa configurazione produce livelli elevati di rumore acustico dovuto all'effetto corona. Tale problema diventa rilevante quando la tensione supera i 300kV [85]. Inoltre, un altro problema da considerare è la trasformazione del sostegno. Per la realizzazione di una linea split-phase è necessario effettuare dei lavori come se si passasse da una singola terna ad una doppia terna, con notevoli costi per il gestore della rete elettrica di trasmissione.

#### 7.1.2.2 Uso di circuiti passivi

L'utilizzo di circuiti passivi (loop) consente una riduzione del campo magnetico prodotto da elettrodotti [91]-[93].

Dei conduttori aggiuntivi, con potenziale prossimo o pari a quello di terra, sono connessi in modo da creare un loop e vengono installati sotto la linea aerea. Le correnti indotte nel loop creano a loro volta un campo magnetico che tende a ridurre il campo magnetico principale. La tensione indotta nel loop passivo può essere valutata attraverso la legge di Faraday. Questa, applicata su un circuito chiuso avente impedenza propria, fa circolare la “*corrente mitigante*”  $I_{mit}$  nel loop [94]-[98].

Le analisi sono state effettuate considerando un loop passivo orizzontale, posto sotto la linea, su un piano parallelo al suolo. Questo è formato da due conduttori, P1 e P2 cortocircuitati e paralleli tra loro ed ai conduttori delle linee aeree.

Considerando ancora lo schema 2D di Figura 40, gli assi dei due loop conduttori sono identificati con i punti  $(x_{L1}, y_{L1})$  e  $(x_{L2}, y_{L2})$ .

La tensione  $V$  indotta sul loop è data da:



$$V = -j \omega \phi \quad (7.4)$$

Dove  $\omega$  è la pulsazione e  $\phi$  è il flusso magnetico concatenato con il loop, generato dalla linea aerea di trasmissione.

Il flusso si ricava da:

$$\phi = \ell \int_{x_{P1}}^{x_{P2}} \mathbf{B}_n dx = -\frac{\mu_0 \ell}{4\pi} \sum_{i=1}^n I_i \ln \frac{(x_{L2} - x_i)^2 + (y_{L2} - y_i)^2}{(x_{L1} - x_i)^2 + (y_{L1} - y_i)^2} \quad (7.5)$$

dove  $\mathbf{B}_n$  è la componente della densità del flusso magnetico ortogonale al piano del loop e  $\ell$  è la lunghezza della linea aerea di trasmissione.

Una volta determinata la tensione indotta e considerata l'impedenza del loop, la corrente indotta è data da:

$$I_{mit} = \frac{V}{Z} \quad (7.6)$$

dove  $Z$  è l'impedenza del loop. La corrente indotta nel loop genera un campo magnetico mitigante, denominato  $\vec{\mathbf{B}}_{mit}$ . Il calcolo di  $\vec{\mathbf{B}}_{mit}$  può essere effettuato così come mostrato in 7.1.1 per il campo magnetico non mitigato.

Pertanto, le due componenti di  $\vec{\mathbf{B}}_{mit}$  al punto di osservazione  $\mathbf{P}$  valgono:

$$\mathbf{B}_{mit,x}(x_P, y_P) = \frac{\mu_0 I_{mit}}{2\pi} \left[ \frac{y_{L1} - y_P}{(x_{L1} - x_j)^2 + (y_{L1} - y_j)^2} - \frac{y_{L2} - y_P}{(x_{L2} - x_j)^2 + (y_{L2} - y_j)^2} \right] \quad (7.7)$$

$$\mathbf{B}_{mit,y}(x_P, y_P) = \frac{-\mu_0 I_{mit}}{2\pi} \left[ \frac{x_{L1} - x_P}{(x_{L1} - x_P)^2 + (y_{L1} - y_P)^2} - \frac{x_{L2} - x_P}{(x_{L2} - x_j)^2 + (y_{L2} - y_P)^2} \right] \quad (7.8)$$

Il campo magnetico risultante è ricavato dalla somma vettoriale tra il campo magnetico non mitigato, ed il campo magnetico ausiliario mitigante. Questo, vale:

$$\vec{\mathbf{B}}_T(x_P, y_P) = \vec{\mathbf{B}}(x_P, y_P) + \vec{\mathbf{B}}_{mit}(x_P, y_P) \quad (7.9)$$

### 7.1.3 Risultati

Lo studio [99] è stato effettuato per una linea a 150kV in doppia terna avente conduttore di tipo ACSR con diametro 31.5mm.

Le principali caratteristiche della linea sono le seguenti:

- tensione nominale: 150kV;
- diametro dei conduttori: 31.5mm;
- diametro fune di guardia: 11.5mm;
- distanza da terra del conduttore più basso: 33.5m;
- lunghezza della campata: 350m.

I due loop considerati, posti a 3.5m dal conduttore più basso sono lunghi 350m.

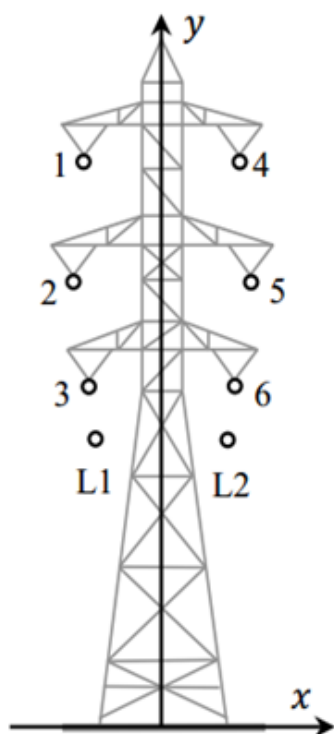


Figura 41. Schema della linea aerea a 150kV considerata

Conduttore	x[m]	y[m]
1	-4.0	45.5
2	-5.4	39.5
3	-4.4	33.5
4	4.0	45.5
5	5.4	39.5
6	4.4	33.5
L1	-4.0	30.0
L2	4.0	30.0

Tabella 46. Riferimenti geometrici per la linea di Figura 41

Figura 41 e Tabella 46 descrivono le caratteristiche geometriche della linea presa in esame.

Considerando come correnti di calcolo:

- A.  $I=300\text{A}$  - valore di corrente standard per una linea a 150kV;
- B.  $I=869\text{A}$  - valore di corrente calcolato attraverso la norma CEI 11-60[24];

C.  $I=1189A$  - valore massimo di corrente determinato attraverso il modello matematico di Schurig e Frick [44];  
ed applicando le relazioni matematiche esplicitate ai paragrafi 7.1.1 e 7.1.2.2, il campo magnetico non mitigato è stato calcolato per tutti e tre i casi.

Dopodiché al fine di ridurre il campo magnetico prodotto dalla linea DT sono state applicate le seguenti tecniche di mitigazione:

- trasposizione delle fasi di una singola terna;
- uso di due loop passivi.

La Figura 42, la Figura 43 e la Figura 44 riportano i risultati ottenuti per i casi A,B e C. La densità di induzione magnetica è stata calcolata in RMS, a terra, lungo una linea retta perpendicolarmente agli assi dei conduttori.

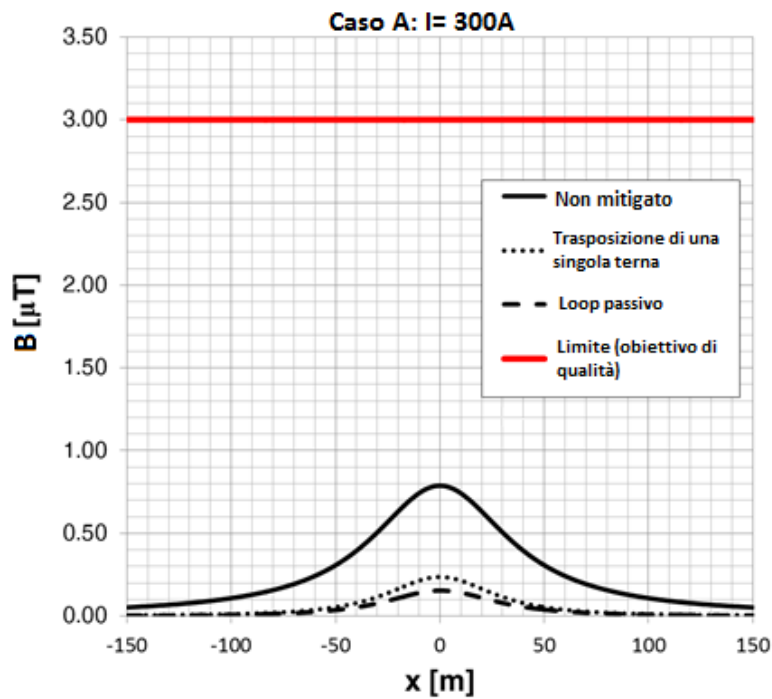


Figura 42. Densità del flusso magnetico (RMS) sul terreno, con e senza tecniche di mitigazione, per il caso A

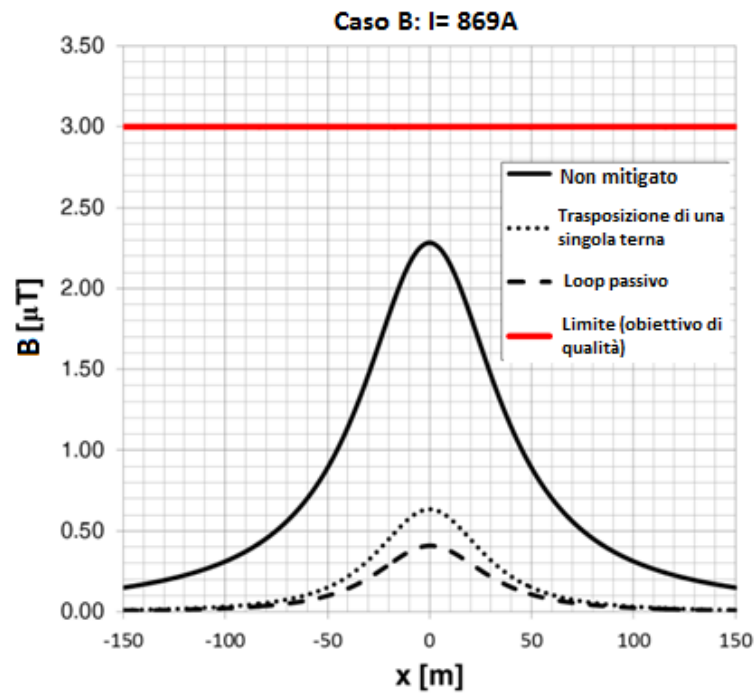


Figura 43. Densità del flusso magnetico (RMS) sul terreno, con e senza tecniche di mitigazione, per il caso B

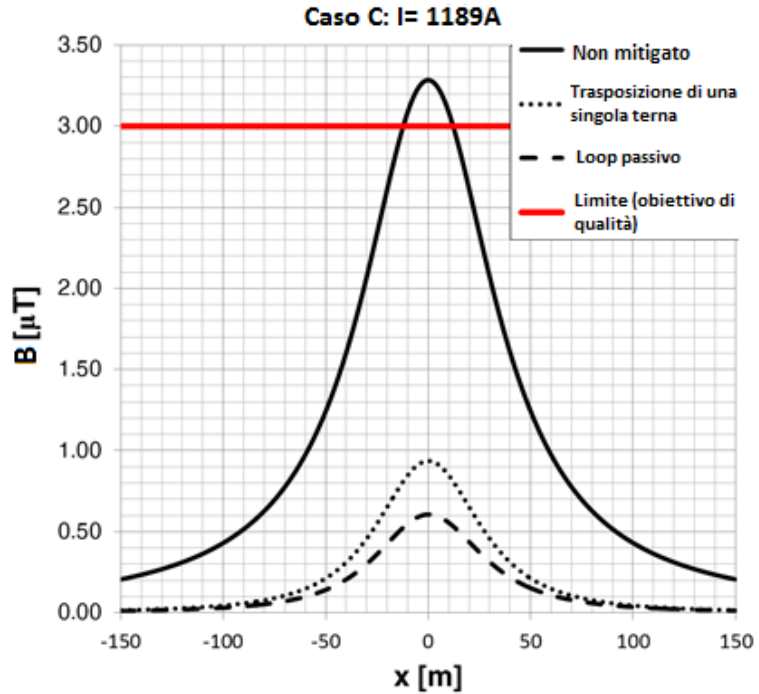


Figura 44. Densità del flusso magnetico (RMS) sul terreno, con e senza tecniche di mitigazione, per il caso C

Con riferimento ai limiti di esposizione riportati in 7.1, mentre nei casi A e B non si ha il superamento dell'obiettivo di qualità, nel caso C questo si verifica. Tuttavia, attraverso la semplice trasposizione delle fasi, il valore rientra al di sotto dei limiti di legge.

In Tabella 47 viene riportato un riepilogo dei risultati.  $B_{max}$  è il valore massimo calcolato, e RP (Riduzione Percentuale) è la riduzione percentuale rispetto al campo non mitigato (NM) applicando i metodi di mitigazione.

	NM	TRASPOSIZIONE FASI	LOOP PASSIVI		
$I [A]$	$B_{max} [\mu T]$	$B_{max} [\mu T]$	RP	$B_{max} [\mu T]$	RP
300	0.8	0.25	69%	0.15	81%
869	2.3	0.62	73%	0.4	83%
1189	3.3	0.92	72%	0.61	82%

Tabella 47. Riduzione del campo magnetico linea aerea

Come si evince dalla Tabella 47, attraverso l'applicazione di tecniche di mitigazione si ottengono importanti riduzioni dell'induzione magnetica al suolo. Nello specifico si ha una riduzione intorno al 71% nel caso di trasposizione delle fasi, ed intorno all'82% nel caso di applicazione di loop passivi sotto la linea.

## 7.2 Mitigazione del campo magnetico prodotto da una linea in cavo a 380kV

Così come già descritto precedentemente in 7.1, la valutazione dei campi magnetici prodotti dalle linee di potenza risulta assolutamente importante al fine di pianificare delle strategie di mitigazione che riguardano la salute umana e l'ambiente circostante.

In questo paragrafo verranno prima analizzate alcune tecniche di mitigazione attualmente presenti nel mondo ed in letteratura, e poi queste, verranno applicate su una linea in cavo a 380kV.

Tutto ciò al fine di determinare la soluzione migliore, che consenta una concreta ed efficiente riduzione del campo magnetico.

### 7.2.1 Metodi di mitigazione del campo magnetico per linee in cavo

Considerata una certa configurazione di sorgente di correnti e di possibili dispositivi di schermatura, la valutazione numerica dei campi magnetici ELF può essere affrontata, tenendo conto che i materiali ferromagnetici, se presenti, sono caratterizzati da un comportamento non lineare.

Inoltre, all'interno degli elementi di schermatura, sorgono fenomeni elettromagnetici complessi. Soluzioni elettromagnetiche 2D potrebbero essere adatte per alcune configurazioni e/o analisi preliminari. Tuttavia in generale, sono necessarie delle soluzioni elettromagnetiche 3D al fine di prendere in considerazione la complessità geometrica piena dei domini considerati.

Il problema della determinazione del campo magnetico in presenza di schermi magnetici, può essere affrontato mediante un metodo ibrido, dividendo il dominio del problema in due regioni che sono accoppiate da un' interfaccia.

La regione interna include tutti i conduttori, gli schermi ed una porzione dello spazio libero, mentre la regione esterna è infinita e omogenea (spazio libero).

Il problema della determinazione del campo magnetico è effettuata, nella regione interna con il metodo degli elementi finiti (FEM); nella regione esterna attraverso il metodo degli elementi di contorno (BEM) [100].

Il campo magnetico prodotto da una linea in cavo di trasmissione dipende dalla corrente che fluisce sulla linea e dalla mutua distanza tra i cavi. Generalmente le tecniche di mitigazione possono essere raggruppate in due gruppi principali:

- *metodi intrinseci*, cambiando i parametri geometrici ed elettrici della linea che influenzano la nascita del campo magnetico;
- *metodi esterni*, che richiedono l'uso di applicazioni esterne per la mitigazione verso l'ambiente circostante del campo magnetico.

Possibili soluzioni intrinseche sono ottenute agendo sulla disposizione delle fasi, o mantenendo i cavi sotterranei lontani dal piano di calpestio. Metodi ed applicazioni di soluzioni intrinseche sono descritti in [101]-[105].

Tecniche di mitigazione esterne utilizzano schermi attivi o passivi, posizionati vicino la sorgente del campo da mitigare [106]-[115].

Schermi attivi sono conduttori che formano una rete alimentati da generatori di corrente adeguatamente controllati. Le correnti nello schermo generano un campo magnetico che tende ad attenuare il campo magnetico esterno. Tali tecniche richiedono un sistema di controllo che moduli la corrente nello schermo (conduttori) per seguire la variazione del campo magnetico esterno. Il loro uso non è abituale nel contesto delle linee di trasmissione in AT.

Al fine di ridurre la distribuzione verso l'ambiente circostante del campo magnetico prodotto da una linea in cavo è possibile utilizzare schermi passivi. Questi possono essere:

- schermi ferromagnetici;
- schermi conduttivi.

Gli schermi ferromagnetici intercettano il campo magnetico vicino alla sorgente, attenuandolo verso la regione circostante. Lastre di materiale ferromagnetico vengono posizionate vicino o al di sopra la linea di trasmissione in cavo.

Il principio di funzionamento degli schermi conduttivi si basa invece sulla legge di Faraday-Neumann-Lenz: correnti parassite generate dal campo magnetico esterno (inducente) tendono a generare un campo magnetico che si oppone a quello principale.

## **7.2.2 Uso di schermi per la riduzione del campo magnetico**

### **7.2.2.1 Uso di schermi ferromagnetici**

Gli schermi ferromagnetici sono fatti da materiale che presenta un' elevata permeabilità magnetica. Questi, sono posizionati usualmente vicino la linea di potenza e presentano una maggiore efficienza tanto più sono piazzati vicino la sorgente del campo. Per campi magnetici ELF, al fine di ottenere un' efficiente schermatura, è necessaria un'elevata quantità di materiale ferromagnetico, solitamente acciaio. Di conseguenza questi sono costosi e pesanti.

L'efficienza della schermatura dipende [116]:

- dalla permeabilità magnetica del materiale;
- dal livello di copertura delle sorgenti di campo magnetico;
- dalla distanza tra le fonti e la schermatura;

- dallo spessore della schermatura. L'efficienza non varia sensibilmente se si utilizzano lastre di spessore tra i 5 e 10mm. Per spessori inferiori a 2mm, invece, l'efficienza diminuisce significativamente.

#### **7.2.2.2 Uso di schermi conduttivi**

Gli schermi conduttivi passivi sono generalmente costituiti da alluminio o rame. Al fine di effettuare una buona schermatura i componenti dello schermo devono essere ben saldati garantendo in tal modo una buona continuità elettrica [117]-[119]. I principali fattori dell'efficienza schermante dipendono da [116]:

- conducibilità elettrica degli schermi del materiale utilizzato;
- estensione della schermatura;
- distanza tra la sorgente e lo schermo.

I loop passivi sono particolari schermi conduttivi. Questi, sono fatti da conduttori elettrici collegati tra loro per creare dei circuiti chiusi, e sono utilizzati sia per cavi interrati che per linee aeree di trasmissione [120]-[121]. Inoltre, al fine di aumentare la corrente indotta nei circuiti passivi possono essere inseriti anche dei condensatori per compensare la loro auto-induttanza [122].

#### **7.2.3 Risultati**

Lo studio [123] è stato effettuato per una generica linea in cavo a 380kV. In Figura 45 la configurazione standard (SC) della linea costituita da tre cavi: "R", "S" e "T" che seguono la sequenza diretta.

I cavi sono equipaggiati con isolamento in olio e presentano sezione pari a 2100 mm<sup>2</sup>.



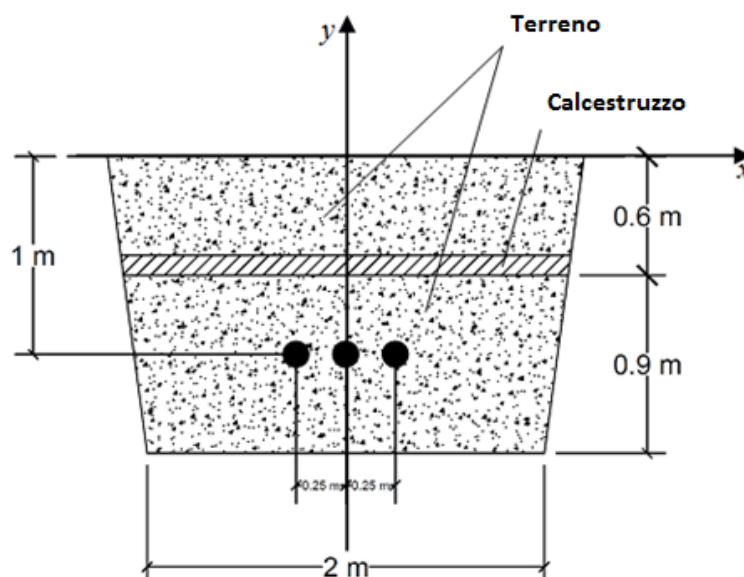


Figura 45. Configurazione standard dei cavi

Il campo magnetico è stato valutato per diverse condizioni di carico; in particolare sono stati esaminati tre casi:

- A.  $I=250A$  - valore di corrente che fluisce per la maggior parte della giornata sul cavo;
- B.  $I=916A$  - valore massimo di corrente che può essere utilizzato sul cavo durante alcune ore della giornata ed in particolari condizioni di funzionamento;
- C.  $I=1890A$  - valore massimo di corrente che può fluire nel cavo.

Inoltre, al fine di verificare l'obiettivo di qualità imposto dalla legge di  $3\mu T$  [22] sono stati scelti e simulati i seguenti metodi di mitigazione:

- uso di schermi conduttivi in alluminio aventi 3mm di spessore. In Figura 48, Figura 49 e Figura 50 dove sono riportati i risultati, gli andamenti riferiti a questo caso saranno chiamati *SCS* (Configurazione standard con schermi conduttivi);
- *split-phase*: passaggio da 3 a 6 cavi, e divisione delle correnti per ogni cavo - *SP*;
- applicazione congiunta dello *splittamento delle fasi* ed uso di schermo conduttivo sopra i cavi - *SPS*.

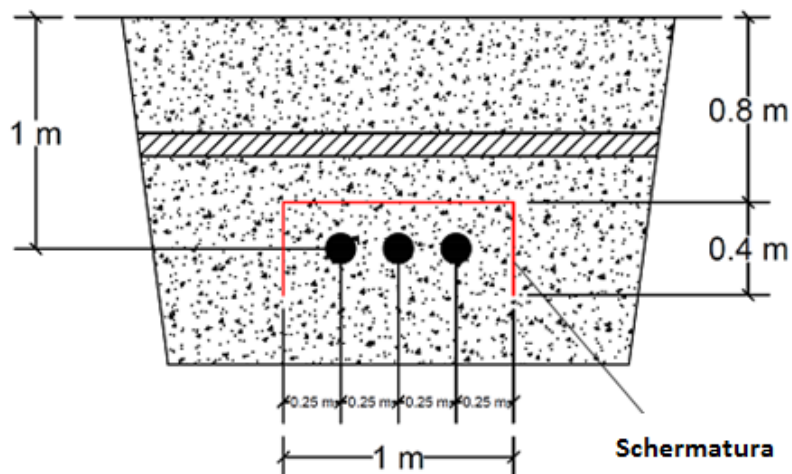


Figura 46. Geometria della schermatura e posizionamento per il caso SCS

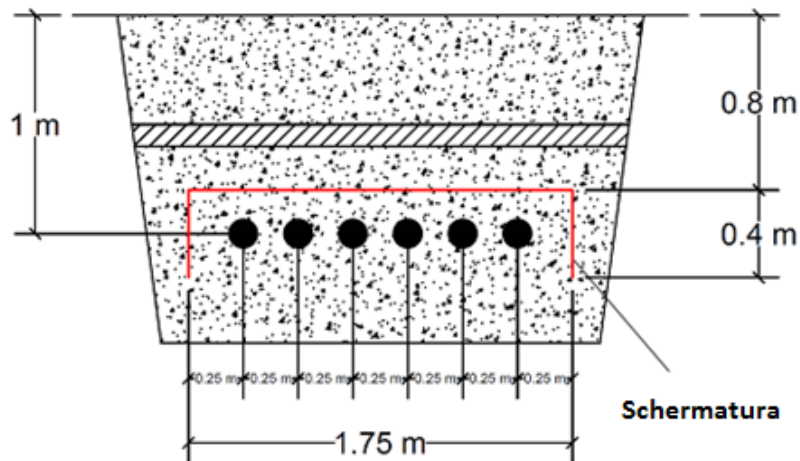


Figura 47. Linea split-phase per i casi SP e SPS; geometria della schermatura e posizionamento per il caso SCS

La Figura 46 e la Figura 47 mostrano la forma e le dimensioni geometriche della schermatura simulata per i casi SCS e SPS.

L'ampiezza del flusso del campo magnetico dovuto alla linea è stato valutato ad 1m sopra il piano di calpestio ortogonalmente alla direzione della linea.

Si riportano in Figura 48(caso A), Figura 49(caso B) e Figura 50(caso C) i risultati.

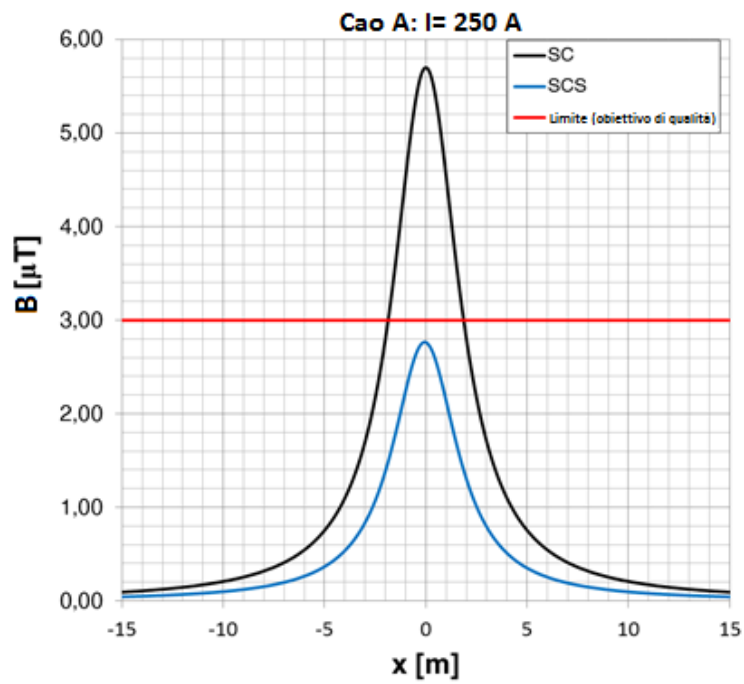


Figura 48. Andamento del campo magnetico sul terreno per il caso A in condizioni standard (SC), con sola schermatura (SCS)

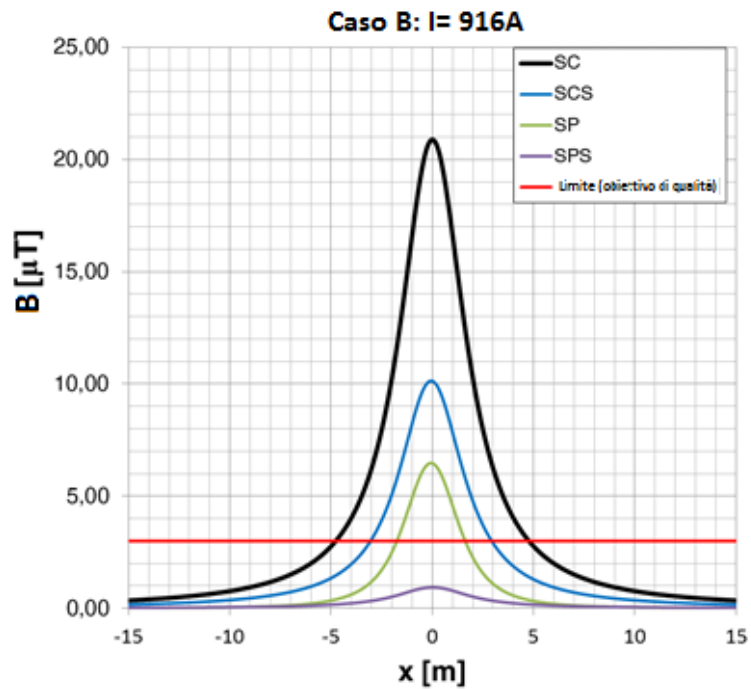


Figura 49. Andamento del campo magnetico sul terreno per il caso B in condizioni standard (SC), con sola schermatura (SCS), in split-phase (SP), e con schermatura e split-phase (SPS)

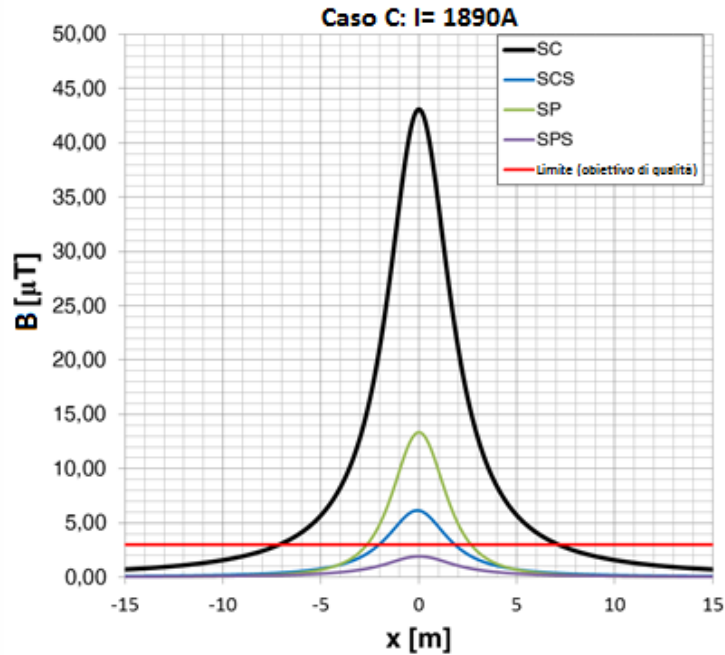


Figura 50. Andamento del campo magnetico sul terreno per il caso C in condizioni standard (SC), con sola schermatura (SCS), in split-phase (SP), e con schermatura e split-phase (SPS)

Anche in questo caso i limiti imposti dalla legge sono quelli riportati in 7.1.

Nel caso A la sola adozione dello schermo conduttivo sarebbe sufficiente a ridurre il campo magnetico. Per i casi B e C il solo uso degli schermi o dello *splitting* delle fasi, non è sufficiente per rispettare il limite di  $3\mu\text{T}$ . In questi casi la sola combinazione SPS garantisce un campo magnetico inferiore all'obiettivo di qualità.

In Tabella 48 viene riportato un riepilogo dei risultati.  $B_{\text{max}}$  è il valore massimo calcolato, e RP (Riduzione Percentuale) è la riduzione percentuale rispetto alla configurazione standard (SC) applicando i metodi di mitigazione.

	SC	SCS		SP		SPS	
$I [A]$	$B_{\text{max}} [\mu T]$	$B_{\text{max}} [\mu T]$	RP	$B_{\text{max}} [\mu T]$	RP	$B_{\text{max}} [\mu T]$	RP
250	5.70	2.76	-51.6%	-	-	-	-
916	20.89	10.13	-51.5%	6.46	-69.1%	0.93	-95.6%
1890	43.10	6.15	-85.7%	13.36	-69.0%	1.90	-95.6%

Tabella 48. Riduzione del campo magnetico linea in cavo

I *limiti di esposizione* non vengono superati in nessun caso, ma per i casi B e C, al fine di scendere al di sotto del *valore di attenzione* e dell'*obiettivo di qualità*, sono necessari dei metodi di mitigazione.

Queste considerazioni, anche in vista dell'incremento della potenza che transiterà sui futuri collegamenti con il continente, sono sicuramente di notevole importanza.

### 7.3 Determinazione del campo elettrico per una linea a 380kV

Un altro aspetto importante, in termini di compatibilità elettromagnetica per una linea a 380kV, è verificare che il campo elettrico generato da un elettrodotto non superi i *limiti di esposizione* di 5kV/m definiti dalla legge [81]-[82].

Considerato che il nuovo collegamento è stato autorizzato da tutti gli organi competenti, si presuppone che questo verifichi tutte le normative vigenti. Pertanto, lo studio è stato effettuato su una delle campate con franco elettrico da terra più basso dell'attuale elettrodotto Sorgente-Rizziconi. In questo modo i risultati ottenuti si possono estendere a tutte le campate della linea attuale.

La linea in oggetto presenta fascio trinato di conduttori da 31.5mm, e due funi di guardia da 11.5mm. In Tabella 49 viene riportata la configurazione geometrica dei conduttori adoperata per le simulazioni, relativa alla campata più bassa della linea.

Conduttore	x[m]	y[m]
1	-11.1	14.5
2	0	18.5
3	9.3	17.7
FdG1	-4	24
FdG2	4	24

Tabella 49. Configurazione campata più bassa linea Sorgente – Rizziconi I

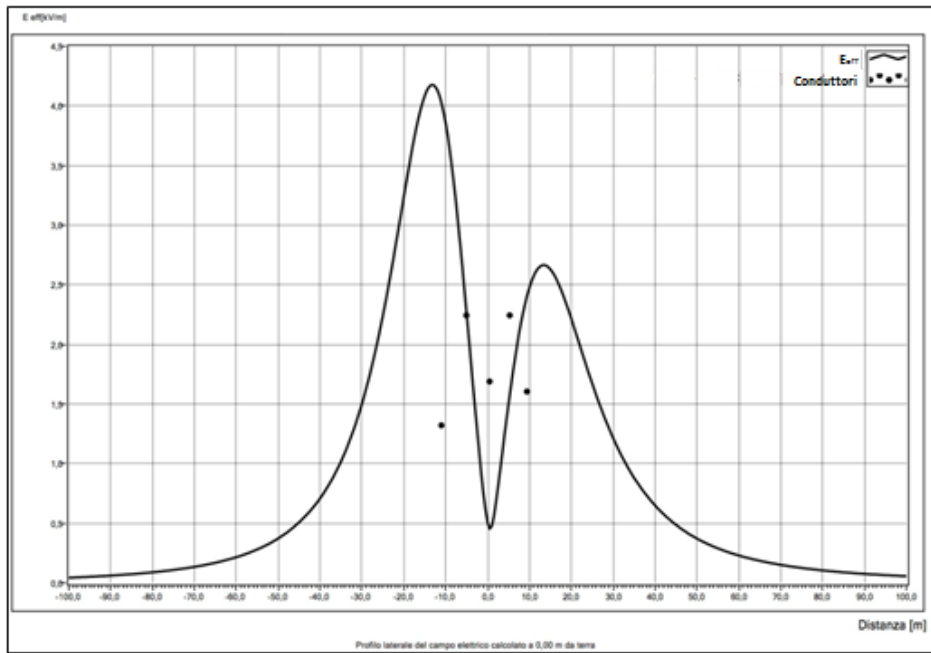


Figura 51. Profilo laterale del campo elettrico a terra

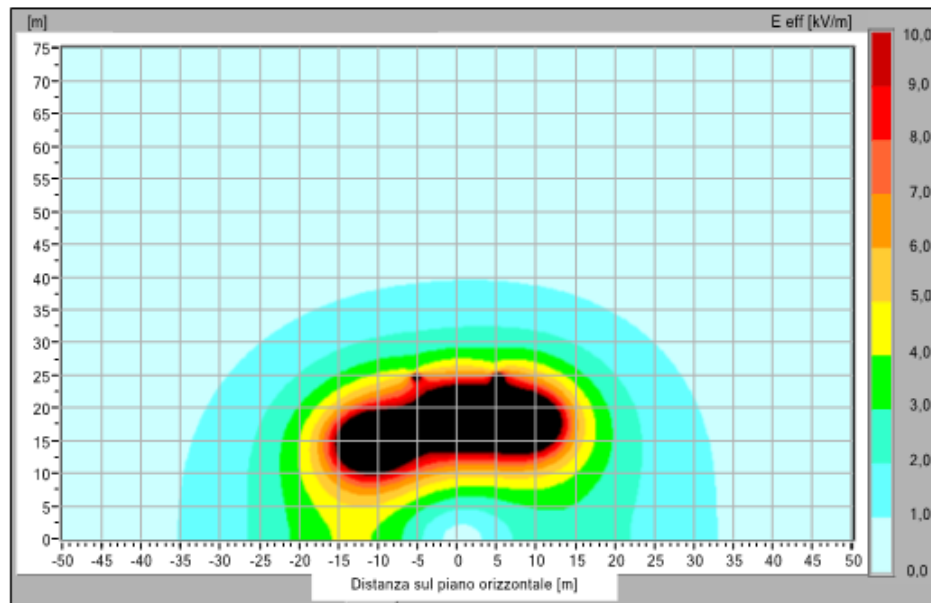


Figura 52. Distribuzione verticale del campo elettrico

I calcoli sono stati effettuati con software in ambiente LabVIEW.

Come si evince da Figura 51 e Figura 52 non vengono superati i limiti di esposizione, pertanto la linea non presenta problemi di superamento del campo elettrico in nessun punto.

In queste condizioni non sono necessarie delle tecniche di mitigazione del campo elettrico.

## Conclusioni

---

La tesi riporta importanti risultati sul miglioramento dell'esercizio delle reti elettriche in alta tensione in Sicilia.

La prima parte della tesi, dove vengono riportati i principali metodi per l'incremento della portata in corrente degli elettrodotti e quindi delle potenze, mostra come attraverso l'applicazione di nuove tecnologie, sia possibile migliorare le condizioni della rete elettrica siciliana, e garantire incrementi di export verso il continente. Questo non solo comporterebbe una migliore stabilità del sistema, ma diminuirebbe il gap del prezzo dell'energia elettrica verso le altre regioni italiane, oltre a migliorare la qualità del servizio elettrico.

Nella seconda parte della tesi, diversi studi di Power Flow mostrano il comportamento della rete nelle condizioni attuali e come questa evolverà da qui a qualche anno. Queste simulazioni hanno mostrato importanti risultati relativamente agli incrementi di export di potenza attiva rispetto alle condizioni attuali di esercizio. Le future interconnessioni pertanto, qualora venissero realizzate, non solo migliorerebbero la condizione della rete siciliana, ma si offrirebbero come infrastrutture strategiche per tutta l'area euro-africana.

Al fine di creare una grande area elettrica del mediterraneo, motore di tutto il sistema elettrico europeo, possibili sviluppi futuri della ricerca potrebbero essere volti allo studio di nuove possibili interconnessioni anche attraverso l'utilizzo di tecnologie HVDC.

Ulteriori sviluppi sulla ricerca potrebbero riguardare l'utilizzo dei sistemi di accumulo in determinate zone della Sicilia. L'uso dei sistemi di accumulo, attualmente in fase di studio anche dal gestore della rete elettrica di trasmissione nazionale, consentirebbe di recuperare centinaia di GWh di energia prodotta da impianti eolici, quantificabili in un notevole risparmio economico per l'intero sistema paese, oltreché in un beneficio per l'ambiente, grazie alla proporzionale cospicua riduzione di emissione di CO<sub>2</sub>.



# Bibliografia

---

- [1] Regione Sicilia (Dicembre 2012)-Assessorato dell'Energia e dei servizi di pubblica utilità. Rapporto Energia 2012, dati sull'energia in Sicilia. Palermo.
- [2] Terna S.p.A. (2009). Elettrodotto a 380kV in doppia terna Sorgente-Rizziconi. Roma.
- [3] Terna S.p.A. (2014).Stato Avanzamento Lavori Elettrodotto a 380kV in doppia terna Sorgente-Rizziconi. Roma.
- [4] V. Cosentino, S. Favuzza, G. Graditi, M. G. Ippolito, F. Massaro, E. Riva Sanseverino, and G. Zizzo, "Transition of a distribution system towards an active network. Part II: Economical analysis of selected scenario", in International Conference on Clean Electrical Power ICCEP'11, pp. 15-20, Italy, 2011.
- [5] V. Cosentino, S. Favuzza, G. Graditi, M. G. Ippolito, F. Massaro, E. Riva Sanseverino, and G. Zizzo, "Smart renewable generation for an islanded system. Technical and economic issues of future scenarios", Energy, vol. 39, pp. 196- 204, Feb. 2012.
- [6] S. Favuzza, G. Graditi, M. G. Ippolito, F. Massaro, R. Musca, E. Riva Sanseverino, and G. Zizzo, "Transition of a distribution system towards an active network. Part I: Preliminary design and scenario perspectives", in International Conference on Clean Electrical Power ICCEP'11, pp. 9-14, Italy, 2011.
- [7] U. C. Chukwu, S. M. Mahajan, I. Spina, R. Rizzo, A Nomogram for Estimating Energy Loss in a Distribution Network due to penetration of V2G, International Conference on Clean Electrical Power ICCEP 2013, Alghero (Italy), 11-13 June 2013.
- [8] E.M. Carlini, S. Favuzza, S.E. Giangreco, F. Massaro, and C. Quaciari, "Upgrading an Overhead Line. Italian TSO Applications to Increase

- System N-1 Security,” 2nd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Icrera 2013, Madrid, October 2013.
- [9] E.M. Carlini, F. Massaro, and C. Quaciari, “Methodologies to uprate an overhead line. Italian TSO case study,” *Journal of Electrical Systems*, vol. 9, issue 4, pp. 422-439, December 2013.
- [10] E.M. Carlini, S. Favuzza, F. Massaro, and C. Quaciari, “Dynamic Thermal Rating of high voltage power lines. A case study in the Sicilian grid,” *L’Energia Elettrica*, vol. 90, issue 4, pp. 53-60, July 2013.
- [11] F. Massaro, R. Miceli, and R. Rizzo, “Dynamic Thermal Rating for overhead lines: self-adaptive protection device,” *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, vol. 12, issue 23, pp. 97-114, July 2013.
- [12] J.S. Engelhardt, S.P. Basu, Design, installation, and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system, *IEEE Transmission and Distribution Conference*, 366-370, 1996.
- [13] Udomkarn Samanmit, Songsak Chusanapiputt, Vuthichai Pungprasert, Increasing of Dynamic Thermal Rating of Transmission Line, *International Conference on Power System Technology*, Chongqing, China 2006.
- [14] E. Cloet, J. L. Lilien, P. Ferrieres, Experiences of the Belgian and French TSOs using the Ampacimon realtime dynamic rating system, *CIGRE General Session*, paper C2-106\_2010, 2010.
- [15] CIGRE WG 22.12.3, Sag tension calculation methods for overhead lines, *ELECTRA*, pp.26-33 , n°232, Paris- June 2007 ISSN:1286-1146.
- [16] J.L.Lilien, Real-Time Ampacity Monitoring with Ampacimon™, [www.ampacimon.com/?dl\\_id=24](http://www.ampacimon.com/?dl_id=24).
- [17] G. Filippone, M.G. Ippolito, F. Massaro, A.Puccio, GIS Systems and LIDAR technology for the operation of HV lines. Sicilian Transmission network applications, *ICRERA 2013*, 20-23 October, Madrid (Spain), ISBN: 978-1-4799-1464-7.
- [18] G. Filippone, M.G. Ippolito, F. Massaro, A.Puccio, “The GIS systems and LIDAR technology in the management of high-voltage power lines.

Applications in the Sicilian electricity grid” *Energia Elettrica*, vol.90, Issue 6, November 2013.

- [19] G. Filippone, M.G.Ippolito, F. Massaro, and A. Puccio, “On the roadmap to Supergrid in Sicily: LIDAR technology and HTLS conductors for upgrading the 150kV lines,” International Conference IEEE PES ISGT 2014, Istanbul, October 2014.
- [20] L. Stefanini, "I sistemi informativi geografici (GIS) e le nuove applicazioni dell'informazione georeferenziata," University of Bologna, Bologna, 2011.
- [21] M. Cavalli and P. Tarolli, "Application of LiDAR technology for rivers analysis," Italian journal of Engineering Geology and Environment, Special Issue 1, pp. 5-8, 2010.
- [22] Decreto Ministeriale 21 marzo 1988, n. 449, “Approvazione delle norme tecniche per la progettazione, l'esecuzione e l'esercizio delle linee aeree esterne”.
- [23] IEEE STD 738-2006, IEEE Standard for Calculating the current-temperature of bare overhead conductors, IEEE Power engineering society, pp. 1-59, 2007.
- [24] C. E. Italiano, "CEI 11-60-Carrying capacity at thermic limit of overhead lines exceeding 100kV," CEI, Milan, 2002.
- [25] M. Ishikawa, H. Ito, “Practical Application of an Extremely Low-Sag Invar Reinforced Increased-Capacity Extra-Heat-Resistant Aluminum Alloy Conductor”. *Sumitomo Electric Technical Review*, No. 28, pp. 161-171, January 1989.
- [26] S. Sasaki, T. Akiyama, K. Okada, T. Okumura, I. Matsubara, K. Fuji, “GACSR New Type Conductor for Increasing Current of Existing Overhead Lines”. *CIGRE Symposium Brussels, 06-85, 220-0 I*, 1985.
- [27] M. J. Tunstall, S. P. Hoffmann, N. S. Derbyshire y M. J. Pyke, “Maximizing the Ratings of National Grid’s Existing Transmission Lines Using High Temperature, Low Sag Conductor”. *CIGRE 2000, Paris, August 2000*.

- [28] S. Sakabe, N. Mori, K. Sato, Y. Miyake y A. Tanaka, “Development of Extremely-Low-Sag Invar Reinforced ACSR (XTACIR)”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1505-1511, April 1981.
- [29] Hitachi Cable Ltd., “Introduction of Hitachi-Invar Reinforced Aluminum-Conductors”, TD 80-12006, January 1999.
- [30] The Furukawa Electric Co. Ltd. “Thermo-Resistance Aluminum-Alloy Conductors Invar Reinforced’. No. TD 89-035 E.
- [31] H. W. Adams. “Steel Supported Aluminum Conductors (SSAC) for Overhead Transmission Lines”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 5, pp. 1700-1705, Sept./Oct. 1974.
- [32] F.R. Thrash, “ACSS/TW- An Improved Conductor for Upgrading existing Lines or New Construction”. IEEE Transmission I Distribution Conference (99CH36333), Vol. 2, pp. 852-857, 1999.
- [33] I. Zamora, A. J. Mazon, P. Eguia, R. Criado, C. Alonso, J. Iglesias, and J. R. Saenz, “High-temperature conductors: A solution in the uprating of overhead transmission lines,” presented at the Power Tech Conf., Porto, Portugal, 2001.
- [34] Kotaka, S., et al, “Applications of Gap-Type Small-Sag Conductors for Overhead Transmission Lines”, SEI Technical Review, Number 50, June, 2000.
- [35] CESI, Nuove tipologie di conduttori per linee elettriche aeree, Milano, 2003.
- [36] CESI, Verifica dell’installazione sperimentale dei conduttori a ridotto coefficiente di dilatazione termica e relativa morsetteria, Milano, 2003.
- [37] Sasaki, S. et al, “ZTACIR-New Extra-Heat Resistant Galvanized Invar-Reinforced aluminium alloy conductor”, Sumitomo Electric Technical Review, Number 24, January, 1985.
- [38] CIGRE WG B2.12, Conductors for the uprating of overhead lines, ELECTRA, pp. 26-29 , n°213, Paris - April 2004 ISSN:1286-1146.
- [39] ASTM B856-95, “Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Aluminium Conductors”, Coated Steel Supported (ACSS).

- [40] Giuseppe Paternò, “Tecniche di tracciamento dei flussi di potenza nei sistemi elettrici di trasmissione. Implementazioni e possibili applicazioni per la rete siciliana” Tesi di laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica, Scuola Politecnica, Università di Palermo, 2014.
- [41] <http://atlanteolico.rse-web.it/viewer.htm> [accesso a Marzo, 2014].
- [42] <http://atlasole.gse.it/atlasole/> [accesso a Marzo, 2014].
- [43] [www.terna.it/default/home/SISTEMA\\_ELETTTRICO/dispacciamento/StimaDomandaOrariaEnergia.aspx](http://www.terna.it/default/home/SISTEMA_ELETTTRICO/dispacciamento/StimaDomandaOrariaEnergia.aspx) [accesso a Marzo, 2014].
- [44] C.E. Italiano, “CEI 11-4 - Technical standards for the erection of overhead power lines outside,” CEI, Milan, 2011
- [45] S.Favuzza, M.G.Ippolito, F. Massaro, G.Paternò, A. Puccio, G. Filippone, “A new approach to increase the integration of RES in a mediterranean island by using HTLS conductors”, Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga Technical University, Latvia, 11-13 May 2015.
- [46] A. Iliceto, R. De Zan, and M. Rebolini, “Interconnessioni elettriche italiane: innovazione per lo sviluppo del sistema,” L’Energia Elettrica, vol. 90, issue 6, pp. 21-28, November 2013, ISSN 00137308.
- [47] C. Brancucci Martínez-Anidoa, A. L’Abbate, G. Migliavacca, R. Calisti, M. Sorannob, G. Fulli, C. Alecua, and L.J. de Vriesc, “Effects of North-African electricity import on the European and the Italian power systems: a techno-economic analysis,” Electric Power Systems Research, issue 96, pp. 119-132, 2013.
- [48] S.Favuzza, M.G.Ippolito, F. Massaro, G.Paternò, A. Puccio, “2015-2020. Sicilia and Italy as electricity hub in the mediterranean area for the development of the European power grids interconnections”, Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga Technical University, Latvia, 11-13 May 2015.
- [49] Colla L., Marelli M., Lauria S., Schembari M., “Mediterranean high voltage submarine cable links technology and system challenges”, AEIT annual conferance, Palermo, 3-5 October 2013.

- [50] Hawila D., Mezher T., Kennedy S., Mondal A., “Renewable Energy readiness assessment for North African countries”, Technology Management for Emerging Technologies (PICMET), Vancouver, BC, July 29 2012-Aug. 2, 2012.
- [51] Carlini E.M, Favuzza S., Ippolito M.G., Madonia A., Massaro F., Quaciari C.: Le fonti rinnovabili in Sicilia: impatti sul mercato zonale e sulla gestione del sistema elettrico. *L'Energia Elettrica*, Vol. 92, n. 5, settembre-ottobre 2014, p. 59-69.
- [52] European Commission, “Energy infrastructure priorities for 2020 and beyond - A Blueprint for an integrated European energy network,” COM(2010) 677 final, November 2010.
- [53] European Commission, Energy Roadmap 2050, COM(2011) 885, December 2011.
- [54] DESERTEC Industrial Initiative (DII). <http://dii-eumena.com/> [accesso a Dicembre, 2014].
- [55] Medgrid. <http://www.medgrid-psm.com/> [accesso a Dicembre, 2014].
- [56] J. Arrillaga, High Voltage Direct Current Transmission, ISBN 0-852969-41-4, the Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [57] T. J. Harnmons et al., “Role of hvdc transmission in future energy development,” *IEEE Power Engineering Review*, pp. 10-25, Febuary 2000
- [58] A. M. Gole "HVDC course notes," Manitoba HVDC Research Centre, Canada, 2000.
- [59] D.Madhan Mohan, Bhim Singh ,B.K Panigrahi “HVDC Technology for Power Transmission”, *Electrical India*, July 2008.
- [60] V. Collet-Billon, et al., “The SACOI (Sardinia-Corsica-Italy) multi terminal link: commissioning tests of the Corsican station Lucciana,” CIGRE Session 1988 paper 14-12.
- [61] MED-EMIP, MEDRING Update Study: Mediterranean electricity interconnections, April 2010. <http://www.medemip.eu> [accesso a Dicembre, 2014].
- [62] V. Arcidiacono, et al., “System commissioning tests for SACOI-2 HVDC three-terminal link,” CIGRE Session 1994 paper 14-107.

- [63] A. Orini, et al., “Qualification test program for the 400kV HVDC deep water interconnection between Italy and Greece,” CIGRE Session 1996 paper 21-304.
- [64] N.D. Hatziargyriou, et al., “Investigation of FACTS applications in the Hellenic transmission system considering power flow variations including Greece-Italy HVDC link,” CIGRE Session 2000 paper 14-106.
- [65] S. Corsi, et al., “The Italy – Greece HVDC link,” CIGRE Session 2002 paper 14-116.
- [66] C. Pincella, et al., “Feasibility of a new long distance submarine HVDC link between Sardinia island and Italian peninsula (SAPEI),” CIGRE Session 2004 paper B4-206.
- [67] R. Granadino, et al., “Feasibility studies of the HVDC submarine interconnection between the Spanish peninsula and the Balearic island of Mallorca,” CIGRE Session 2006 paper B4-104.
- [68] J. Prieto, et al., “The RÓMULO project, Spanish peninsula – Mallorca (243 km, 250kV, 2x200 MW): first Spanish HVDC link,” CIGRE Session 2010 paper B4-204.
- [69] P. Adam and J. Kowal “Medgrid—An industrial initiative for the development of interconnections between the Mediterranean power grids,” International Conference IEEE EPE 2013, Lille, September 2013.
- [70] Caciolli, L., Carlini, E.M., Cassaro, C., Giannuzzi, G.M., Pascucci, A., Favuzza, S., et al. “Sicilia-Malta: il nuovo collegamento RTN a 220 kV in corrente alternata”, L'ENERGIA ELETTRICA, 92 (Volume 92, numero 4), 19-29, 2015.
- [71] [www.terna.it/default/Home/SISTEMA\\_ELETTRICO/CantieriTernaPerItalia.aspx](http://www.terna.it/default/Home/SISTEMA_ELETTRICO/CantieriTernaPerItalia.aspx). [accesso a Novembre, 2014].
- [72] S. Lauria and F.Palone, “Operating envelopes of the Malta-Sicily 245 kV-50 HZ cable,” 2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition/Future Energy Grids and Systems Symp, Florence, September 2012.
- [73] E.M. Carlini, C. Vergine, C. Quaciari, S. Biondi, and M. Delfanti, “Possibili sviluppi della RTN in Sicilia per massimizzare il

- dispacciamento di energia eolica,” *L’Energia Elettrica*, vol. 88, pp. 9-20, Ottobre 2011.
- [74] M.H. Repacholi and B. Greenebaum “Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: health effects and research needs,” *Bioelectromagnetics*, Vol. 20, pp. 133–160, 1999.
- [75] R.G. Olsen, “The Magnetic Field Environment of Electric Power Lines, Panel Session on Biological Effects of Power frequency Electric and Magnetic Fields, IEEE Publication 86TH0139-6-PWR, pp. 4–10, 1986.
- [76] WHO Press Office, “Electromagnetic fields and public health: extremely low frequency (ELF),” Fact Sheet n. 205, November 1998.
- [77] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics, 1998.
- [78] Council of the European Union, “Council Recommendation on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)” (1999/519/CE), 1999.
- [79] O. Bottauscio, M. Chiampi, R. Conti, M. Repetto and M. Zucca, “Some considerations about environmental ELF magnetic field reduction,” EMC Europe, Brugge, Belgium, Tutorial Session n. 6, pp. 112–121, 2000.
- [80] H. Karawia, K. Youssef and A. A. Hossam-Eldin, “Measurements and Evaluation of Adverse Health Effects of Electromagnetic Fields from Low Voltage Equipments” MEPCON 2008, pp. 436–440, Aswan, Egypt, March 12-15, 2008.
- [81] Italian L. 22 feb. 2001 n. 36, “Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici,” G.U. 7 mar. 2001, n. 55.
- [82] Italian D.P.C.M. 8 lug. 2003, “Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti,” G.U. 29 ago. 2003, n.200.



- [83] CEI Standard 106-11 “Guide for the determination of the respect widths for power lines and substations according to DPCM 8 July 2003 (Clause 6) Part 1: Overhead lines and cables,” CEI, Milan, 2006.
- [84] CEI Standard 211-4 “Guide to calculation methods of electric and magnetic fields generated by power lines,” CEI, Milan, 2008.
- [85] O. Bottauscio, M. Chiampi, R. Conti, M. Repetto and M. Zuca, “Some considerations about environmental ELF magnetic field reduction,” EMC Europe, Brugge, Belgium, Tutorial Session n. 6, pp. 112–121, 2000.
- [86] H. Olsson, P. Pettersson, A. Eriksson, “Reduction of transmission line magnetic fields - possibility and constraints”. CIGRE 1990 Session, paper 36–101.
- [87] R. Conti, "Riduzione del campo magnetico". Rivista AEI, Volume 88, Dicembre 2001.
- [88] L. Zaffanella, “Magnetic field management for overhead transmission lines: a primer,” EPRI TR-103328, pp. 50–52, December 1994.
- [89] R. Conti, A. Giorgi, R. Rendina, L. Sartore, E. A. Sena, “Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines,” IEEE Bologna PowerTech Conference 2003, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [90] F. Molnar Matei, P. Andea, A. Pana, R. Teslovan, “Double Circuit 110 kV Overhead Line Magnetic Field Analysis,” 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Yasmine Hammamet, Tunisia, March 25-28, pp. 780–783, 2012.
- [91] V.S. Rashkes, R Lordan, “Magnetic field reduction methods: efficiency and cost,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 552–559, 1998.
- [92] P. Cruz, C. Izquierdo, and M. Burgos, “Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp. 1357–1362, 2003.
- [93] M.M. Saied, “Assessment and Optimal Passive-Loop Mitigation Of Power Lines' Magnetic Fields,” 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, May 19–22, 2008.

- [94] R. Mardiana and M. Poshtan, "Mitigation of Magnetic fields near transmission lines using a passive loop conductor," 2011 IEEE GCC Conference and Exhibition, Dubai, United Arab Emirates, February 19–22, pp.665–668, 2011.
- [95] A. Z. El Dein, "Mitigation of Magnetic Field under Egyptian 500kV Overhead Transmission Line," The 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2010), Shah Alam, Selangor, Malaysia, June 23-24, pp. 215–220, 2010.
- [96] A.R. Memari, W. Janischewskyj, "Mitigation of Magnetic Field Near Power Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1577–1586, 1996.
- [97] Yamazaki, K., Kawamoto, A., and Fujinami, H., "Requirements for power line magnetic field mitigation using a passive loop conductor," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp. 646–651, April 2000.
- [98] P.C. Romero, J.R. Santos, J.C. del Pino Lopez, A. de la Villa Jaen, J.L.M. Ramos, "A Comparative Analysis of Passive Loop-Based Magnetic Field Mitigation of Overhead Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, pp. 1773–1781, July 2007.
- [99] G.Ala, G. Filippone, S.Ganci, M.G.Ippolito, A. Puccio, "Mitigation of 50 Hz Magnetic Field Produced by an Overhead Transmission Line", UPEC 2015, Staffordshire University, Stoke-on-Trent, England, UK, 1-4 September 2015.
- [100] O. Bottauscio, E. Carpaneto, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, I. Panaitescu, "Numerical and experimental evaluation of magnetic field generated by power busbar systems", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 5, pp. 455-460, 1996.
- [101] O. Bottauscio, E. Carpaneto, M. Chiampi, D. Chiarabaglio, I. Panaitescu, "Numerical and experimental evaluation of magnetic field generated by power busbar systems", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 5, pp. 455-460, 1996.

- [102] Cigre, Magnetic field in HV cable systems. 1/systems without ferromagnetic component. Technical Brochure No 104, Joint task force 36.01/21, 1996.
- [103] Cigre, General guidelines for the integration of a new underground cable system in the network. Technical Brochure No. 250, Working Group B1.19, 2004.
- [104] G.G. Karady, C.V. Nunez, R. Raghavan, “The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 647–654, 1998.
- [105] E. Mimos, D. Tsanakas, and A. Tzinevrakis, “Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables,” Electrical Engineering, Vol. 91, No. 6, pp. 327–335, 2010.
- [106] Y. Du, T. Cheng, and A. Farag, “Principles of power-frequency magnetic field shielding with flat sheets in a source of long conductors,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 38, No. 3, pp. 450–459, 1996.
- [107] A. Canova, A. Manzin, and M. Tartaglia, “Evaluation of different analytical and semi-analytical methods for the design of ELF magnetic field shields,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 3, pp. 788–796, 2002.
- [108] A. Canova, D. Bavastro, F. Freschi, L. Giaccone, M. Repetto, “Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines,” Electric Power Systems Research, Vol. 89, pp. 109–115, 2012.
- [109] A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, A. Guerrisi, M. Repetto, “Magnetic field mitigation of power lines by means of passive loop: technical optimization,” COMPEL, Vol.31, pp. 870–880, 2012.
- [110] J.C. del Pino-López, P. Cruz-Romero, L. Serrano-Iribarnegaray, J. Martínez-Román, “Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks,” Electric Power Systems Research, Vol. 114, pp. 21–27, 2014.

- [111] M. Reta-Hernandez and G. Karady, "Attenuation of low frequency magnetic fields using active shielding," *Electric Power Systems Research*, Vol. 45, pp. 57–63, 1998.
- [112] A. Canova and L. Giaccone, "Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop," presented at the 20th Int. Conf. Exhibit. Electricity Distribution, Prague, Czech Republic, June 8–11, 2009.
- [113] R. Mardiana and M. Poshtan, "Mitigation of Magnetic fields near transmission lines using a passive loop conductor," 2011 IEEE GCC Conference and Exhibition, Dubai, United Arab Emirates, February 19-22, pp.665–668, 2011.
- [114] A. Z. El Dein, "Mitigation of Magnetic Field under Egyptian 500kV Overhead Transmission Line," The 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2010), Shah Alam, Selangor, Malaysia, June 23-24, pp. 215–220, 2010.
- [115] A.R. Memari, W. Janischewskyj, "Mitigation of Magnetic Field Near Power Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, pp. 1577–1586, 1996.
- [116] Rapporto CESI A5047417, Ricerca di Sistema (Secondo periodo), "Linee guida sui metodi di riduzione e schermatura del campo magnetico," Milan, 30/09/2005.
- [117] P. Cruz, C. Izquierdo, and M. Burgos, "Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 4, pp. 1357–1362, 2003.
- [118] A. Canova, G. Gruosso, and M. Repetto, "Optimal shielding of low frequency fields," *COMPEL*, Vol. 23, pp. 173–186, 2004.
- [119] A. Canova, G. Gruosso, and M. Repetto, "Integral methods for the analysis and design of low frequency conductive shields," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No. 4, pp. 2009–2017, 2003.
- [120] C95.6 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields 0–3 kHz, C95.6 IEEE Std., IEEE Standards Coordinating Committee 28, 2002.

- [121] A.Canova and L.Giaccone, “A Novel Technology for Magnetic-Field Mitigation: High Magnetic Coupling Passive Loop,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, pp.1625–1633, 2011.
- [122] R. Walling, J. Paserba, and C. Burns, “Series-capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission line magnetic fields,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 461–469, 1993.
- [123] G.Ala, S.Ganci, M.G.Ippolito, A. Puccio, “Attenuation of Low Frequency Magnetic Fields Produced by HV Underground Power Cables”, UPEC 2015, Staffordshire University, Stoke-on-Trent, England, UK, 1-4 September 2015.